

Treball de Fi de Grau/Màster

Enginyeria en tecnologies industrials

Optimització topològica experimental per etapes de peces obtingudes per fabricació additiva tipus DLP

MEMÒRIA

Autor: Daniel Matos Escobar
Director: Miquel Casafont
Convocatòria: Setembre 2019



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Aquest projecte és la continuació directa d'un treball de final de grau i ambdós formen part a la família de projectes basats en l'optimització topològica. La idea principal és fins a quin punt es pot aprofitar la tècnica de fabricació de *Direct Light Processing*, no només per les comoditats i varietat de formes que pot produir, sinó també per estudiar les maneres possibles d'optimitzar una peça determinada amb una geometria de prisma rectangular.

Anteriorment s'havia definit un mètode d'optimització a partir de l'obtenció dels valors de desplaçaments de la peça mitjançant la tècnica de *Digital Image Correlation* (DIC), la problemàtica era que per poder optimitzar en Ansys Workbench, es necessiten els valors de les forces envers els desplaçaments, fet que es va solucionar amb l'obtenció de les reaccions amb signe canviat a la peça. Tanmateix, els resultats no eren coherents, per això en aquest projecte s'ha decidit aplicar uns filtres a les forces de reacció i només considerar les forces properes a l'element d'aplicació de la càrrega que deforma la peça per tal d'obtenir una càrrega repartida a tota una regió. Aquesta proposta d'optimització resulta ser vàlida després de la comparativa amb un model de forces puntuals bàsic i un de contactes. Com l'extracció de material realitzada en tots els models són molt semblants, s'acaba verificant la metodologia i es conclou que és possible obtenir amb Ansys Workbench l'optimització topològica d'una peça de la qual el camp de desplaçaments és conegut experimentalment.

A l'últim apartat es fa un estudi d'optimització de la mateixa peça mitjançant un mètode anomenat *Evolutionary Structural Optimization* (ESO), una metodologia aparentment molt bàsica però efectiva. Si més no, serveix per fer una idea general de com seran els forats l'optimitzar la peça del problema, a banda de ser una manera molt fàcil de programar. Per això s'ha creat una macro en Ansys 19.0 que servirà per poder obtenir tots els resultats i fer comparatives amb la versió de la peça optimitzada en Workbench. No obstant això, els resultats d'aquest mètode depenen de dos paràmetres inicials, anomenats ràtio de rebuig inicial (RR_0) i ràtio evolutiva (ER), que dificulten la verificació i consistència dels mateixos.

Finalment s'arriba a la conclusió que per aquest problema, la configuració ideal és $RR_0=6\%$ i $ER=1\%$ i es comprova com en altres simulacions el mètode segueix sent eficaç si s'escullen els valors apropiats dels paràmetres fonamentals.

Sumari

SUMARI	5
1. GLOSSARI	7
2. PREFACI	9
2.1. Origen del projecte	9
2.2. Motivació	9
2.3. Requeriments previs	10
2.4. Estat de l'art	10
3. INTRODUCCIÓ	13
3.1. Objectius del projecte	13
3.2. Abast del projecte	14
4. OPTIMITZACIÓ TOPOLÒGICA D'UN PRISMA RECTANGULAR	15
4.1 Introducció	15
4.2 Optimització topològica. Conceptes previs.....	16
4.2.1 Mètodes més comuns d'optimització topològica.....	17
4.3 Peça d'estudi i assaig experimental	19
4.4 Optimització mitjançant el mètode dels elements finits en Ansys.....	20
4.4.1 Caracterització bàsica: Tipus d'element, mallat i tipus de càlcul.....	20
4.4.2 Model de càrregues puntuals.....	22
4.4.3 Model de càrregues distribuïdes	24
4.4.4 Model realista	28
4.4.5 Anàlisi i comparativa de resultats entre models	31
5 EVOLUTIONARY STRUCTURAL OPTIMIZATION (ESO)	34
5.1 Introducció i definicions	34
5.1.1 Procediment matemàtic	36
5.2 Algorisme en Ansys APDL	37
5.2.1 Resum del model d'elements finits	37
5.2.2 Explicació detallada del codi	37
5.3 Anàlisi de resultats	41
5.3.1 Estudi de sensibilitat	41
5.3.2 Conclusions de la metodologia ESO	47
5.4 Simulacions complementàries	48
CONCLUSIONS	53

BIBLIOGRAFIA **55**

Referències bibliogràfiques 55

Bibliografia complementària 56

1. Glossari

<i>DIC:</i>	<i>Digital Image Correlation</i>
<i>ESO:</i>	<i>Evolutionary Structure Optimization</i>
<i>SIMP:</i>	<i>Mètode del material sòlid i isotròpic amb penalització</i>
<i>DO:</i>	<i>Displacement Optimization</i>
<i>BESO:</i>	<i>Bilinear Evolutionary Structure Optimization</i>
<i>E:</i>	<i>Mòdul de Young (en MPa/mm² si no es diu el contrari)</i>
<i>F_i:</i>	<i>Força en la direcció i (en N si no es diu el contrari)</i>
<i>ν:</i>	<i>Coefficient de Poisson (per material isotròpic)</i>
<i>σ_e^{vm}:</i>	<i>Tensió de Von Mises d'element e</i>
<i>σ_e^{vm}:</i>	<i>Tensió de Von Mises màxima elemental de tot el model</i>
<i>RR_i:</i>	<i>Ràtio de rebuig (Rejection rate) a la iteració i</i>
<i>RR₀:</i>	<i>Ràtio de rebuig inicial</i>
<i>ER:</i>	<i>Ràtio evolutiva (Evolutionary rate)</i>
<i>V_{conservat}:</i>	<i>Volum que reté la peça</i>
<i>V_{total}:</i>	<i>Volum total que tenia inicialment la peça</i>
<i>V_{eliminat}:</i>	<i>Volum eliminat durant el procediment de l'ESO</i>

2. Prefaci

2.1. Origen del projecte

La tecnologia i tècniques de fabricació de peces està en continua expansió i, actualment, ja existeixen maneres de fabricació additiva, com seria el cas de la impressió 3D. Aquest creixement de les possibilitats en la fabricació ha motivat a la comunitat científica a començar a fer-ne ús de tècniques d'optimització mecànica per tal d'estalviar material i, en conseqüència, poder fabricar més peces. Aquest fet va inspirar a l'autor de [1] i el tutor del present projecte, el professor M.Casafont a fer una investigació exhaustiva sobre com estava en aquella actualitat l'optimització topològica.

Anys més tard, en 2018, una alumna de l'ETSEIB va reprendre el tema a partir de l'estudi [1] i va resultar en un treball de final de grau [2].

Posteriorment i partint de les dues referències anteriors, va sorgir la idea entre un nou alumne de l'ETSEIB i en Miquel d'intentar optimitzar una peça a partir dels valors numèrics de desplaçaments que va desembocar en un nou treball de fi de grau, [3].

Finalment, i amb la intenció de continuar amb el món de l'optimització topològica s'ha originat aquest nou projecte. Inicialment es pretenia una continuació directa de [3], que servís per optimitzar tot el procediment i resultats de l'antecessor i ampliar-lo amb l'estudi d'una optimització per parts de la peça, és a dir, fer un primer assaig, treure un 10% de material mitjançant l'optimització topològica i tornar a assajar, així de manera successiva fins a eliminar un 50% i comparar els resultats. Com no es disposava de la versió completa del programari GOM ARAMIS i el procediment anava a ser molt llarg, es va decidir modificar la trajectòria fins a l'estudi d'un mètode d'optimització iteratiu en el que es basa el llibre [6] que no ve incorporat a Ansys i s'ha de crear una nova macro. Aquest mètode es diu ESO i parteix d'idees molt simples però aporta bons resultats. A més, la idea és similar a fer una optimització per etapes, ja que cada iteració és una solució estable amb menys material que l'anterior i es pretén eliminar més material per la següent. Un cop definits tots els punts del projecte ja només calia procedir.

2.2. Motivació

L'optimització topològica és un camp que cada vegada està prenent més força en la construcció d'elements mecànics i estructures, la qual ja disposa de models matemàtics i software específics per obtenir bons resultats. No obstant això, aquests programes realitzen tots els càlculs a partir de simulacions i hipòtesis de simplificació, fet que motiva aquest treball

a veure els resultats que s'obtidrien introduint directament el camp de desplaçaments en comptes de simular-les a partir de la introducció de forces exteriors. Per això se'n fa ús de la tècnica DIC, que n'obté el camp de desplaçaments real a partir de rastrejar els punts d'una seqüència d'imatges de la peça que ha patit al deformar. Com hi ha molt terreny per explorar en el camp de l'optimització topològica, tota idea nova pot tenir impacte en la comunitat científica. A més, gràcies a l'auge de la impressió 3D, el concepte cada cop està prenent més força, de fet ja hi ha indústries que l'estan començant a implantar. Per tots aquests motius, i per voler continuar amb els estudis realitzats sobre la temàtica a [1], [2] i [3], s'ha decidit dur a terme aquest projecte.

2.3. Requeriments previs

Per poder dur a terme tot l'estudi és necessari una versió superior a la 19.0 del programari Ansys, ja que a partir d'aquesta es va incorporar un mòdul d'optimització topològica de manera inherent a la instal·lació en la seva versió Workbench.

També s'han requerit els resultats dels desplaçaments de tots els punts d'una peça prismàtica rectangular obtingudes a l'assaig durant l'elaboració del treball [3]. Aquest treball pretén ser la seva continuació, per això és necessari el coneixement d'aquest, així com els resultats per poder fer les pertinents verificacions i comparatives.

A més, per molt que una llicència d'Ansys estudiantil sigui suficient, s'ha requerit un ordinador amb bons components hardware, ja que el nombre de simulacions sobretot en l'últim apartat és gran i un processador potent implica un estalvi important del temps.

Finalment ha estat necessari el coneixement sobre la matèria, en concret sobre mecànica dels medis continus i resistència de materials. Sobretot per fer un ús apropiat d'Ansys, entenent com a ús apropiat el fet de saber escollir el tipus d'element, aplicar les restriccions de desplaçaments, interpretar els resultats, etc.

2.4 Estat de l'art

És habitual trobar articles sobre científics que optimitzen una peça mitjançant una simulació, la fabriquen i finalment l'analitzen mitjançant la tècnica DIC. Un exemple d'ús d'aquesta metodologia seria l'article [4], que tracta de fer una optimització topològica d'elements craniofacials impresos en impressora 3D per acabar analitzant les deformacions resultants a unes forces externes que patiria a la realitat. Però la metodologia de trobar els desplaçaments amb DIC i posteriorment optimitzar no és fàcil de trobar en totes les bases de dades utilitzades.

De fet, l'únic article ha estat el [5], on es va resoldre un problema d'enginyeria d'optimització d'un component d'automoció mitjançant la captura d'imatges amb una càmera 3D, posteriorment amb l'ús del programari GOM ARAMIS es van obtenir els desplaçaments i, finalment, es va realitzar una optimització topològica amb Matlab.

Pel que fa a l'estudi de la metodologia ESO, hi ha una infinitat de llibres que l'estudien i, fins i tot, apliquen la seva versió més actualitzada anomenada BESO. Un exemple d'això seria [6], la base d'aquesta part a l'estudi on es fa ús de Matlab per optimitzar un conjunt d'exemples a banda d'explicar detalladament el procediment. Tanmateix, no és fàcil de trobar literatura on s'utilitzi l'Ansys per aplicar aquesta manera d'optimització, encara que no és impossible. En general s'han realitzat diversos estudis de tesi doctoral i altres projectes com [7] que incideixen sobre el mètode i l'amplien al BESO per tal d'assegurar millors resultats. De fet, a [7] hi ha una macro d'ambdós mètodes per Ansys 11. No obstant això, en cap moment s'ha fet servir com a guia, ja que pel que fa a les comandes es troba obsoleta.

3. Introducció

3.1. Objectius del projecte

Principals

- Aplicar els coneixements obtinguts a les assignatures de Resistència de materials, Mecànica dels medis continus, Mètodes numèrics i Anàlisi de components estructurals i mecànics pel mètode dels elements finits del Grau d'Enginyeria en Tecnologies Industrials (GETI).
- Buscar informació sobre l'estat de l'art d'optimitzar una peça a partir de disposar el valor del camp de desplaçaments obtingut segons la tècnica DIC.
- Resoldre un problema d'enginyeria seguint el mètode científic.
- Aconseguir optimitzar una peça real topològicament amb un procediment alternatiu estandarditzat i mitjançant el mètode dels elements finits.
- Millorar la qualitat dels resultats del procediment i la duració d'aquest.
- Crear una macro en Ansys que optimitzi un model 3D ja solucionat mitjançant la metodologia ESO.

Específics

- Millorar els coneixements sobre els programaris Ansys Mechanic APDL, Ansys Workbench i la interacció entre ells.
- Comparar el model realista amb models simulats per tal de verificar si la metodologia és vàlida.
- Optimitzar tot el procediment per tal de disminuir la seva duració i obtenir resultats coherents.
- Anàlisi de discrepàncies en resultats en l'optimització topològica entre els diferents models.
- Verificar els resultats del mètode ESO i comparar-los amb els que s'obtenen en Ansys Workbench.

3.2. Abast del projecte

Al ser un estudi pertanyent a una família de projectes, la primera part s'enfoca principalment en acabar d'optimitzar els resultats del predecessor [3]. No sense abans haver fet un repàs sobre els conceptes previs i mètodes d'optimització topològica més habituals actualment. A més, el projecte aborda un cas realista de la matèria, concretament una peça que se li realitzen unes sol·licitacions i se'n vol optimitzar la seva forma a partir de la captació dels seus desplaçaments reals. Aquesta idea va ser introduïda a [3] però ni es van verificar els resultats, ni es van comparar amb les simulacions més bàsiques que es podrien realitzar en Ansys Workbench. Per aquesta raó s'han definit tres models a comparar en els subapartats finals d'aquesta secció de l'estudi.

A l'últim apartat s'estudia exclusivament la metodologia ESO implementada en Ansys APDL mitjançant macros. La macro es basa en un algorisme matemàtic extret de [6] i s'explica detalladament en un subapartat. Tot i saber que el mètode funciona raonablement bé, és necessari fer la verificació amb els resultats obtinguts a apartats anteriors. Després d'acabar amb les comparatives hi ha l'últim apartat, que es basa a aplicar el codi a altres exemples extrets de [2] per veure si és igual d'efectiu en diferents problemes d'enginyeria.

4. Optimització topològica d'un prisma rectangular

4.1 Introducció

El primer mòdul tracta de reprendre el mètode d'optimització topològica d'una peça quadrada a partir dels resultats de desplaçaments reals mitjançant la tècnica de *Digital Image Correlation* (DIC). Posteriorment, s'optimitzarà el procediment introduït al treball [3] i s'analitzaran i es compararan els resultats amb diversos models d'Ansys. Cal esmentar que totes les condicions de mallat i paràmetres en l'optimització han estat inspirades en el treball [2], per tal de caracteritzar tots els models i garantir els millors resultats possibles, considerant com a millors els més semblants a la literatura.

Primerament s'introduiran un conjunt de conceptes teòrics per explicar i contextualitzar el que s'està estudiant i, finalment, es treballarà amb el mètode dels elements finits per simular el problema.

Els models que s'analitzaran i es compararan són els següents:

1. Model de forces puntuals
2. Model de càrregues distribuïdes
3. Model realista

En tot moment es fa ús del software Ansys, tant en la seva versió Mechanic APDL com la Workbench. Aquesta combinació permet poder introduir totes les condicions i aplicar comandes fàcilment (APDL), per després incorporar-la al mòdul d'optimització topològica del Workbench.

Durant tota aquesta part no s'aplica explícitament la tècnica DIC, tot i que l'anàlisi del model realista (2) és la conseqüència d'aquesta, ja que són els resultats de desplaçaments reals dels punts del contorn de la peça que es van obtenir i processar amb el programari GOM ARAMIS.

4.2 Optimització topològica. Conceptes previs

L'optimització topològica és un mètode matemàtic que serveix per optimitzar una peça mecànicament -entenent per optimització mecànica (o estructural) la reducció de material o addició de forats a zones menys sol·licitades- donades unes condicions de contorn i unes càrregues externes amb la motivació d'obtenir el màxim rendiment d'aquesta. A trets generals es tracta d'obtenir una peça resultant suficientment rígida i amb un percentatge de reducció de volum (o massa) desitjat (Fig. 4.1).

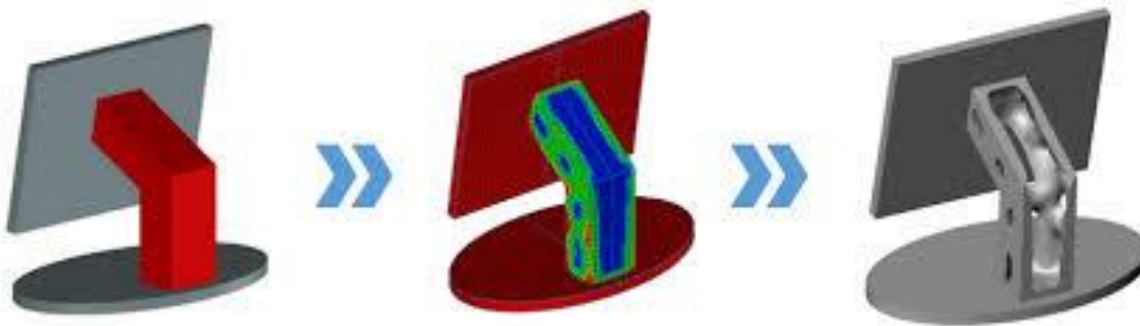


Figura 4.1. Exemple d'optimització topològica. Font: [9]

La idea d'optimitzar peces pren importància en el moment que es vol estalviar material, però per la complexitat de les peces resultants, sobretot si es tracta de peces amb forats tridimensionals, pot impossibilitar la fabricació o, si més no, encarir-la. En l'actualitat, a causa de l'increment de les tècniques de fabricació s'està començant a investigar seriosament la viabilitat d'aquesta secció en la resistència de materials, ja que hi ha materials molt cars i en alguns casos el fet de no malbaratar material encarint el cost de fabricació, pot arribar a ser rendible.

Actualment existeixen diversos models d'optimització topològica, aquests es diferencien per l'enfocament del problema, és a dir, quina és la funció a optimitzar i de quines variables depèn. La majoria dels mètodes busquen reduir material de tal manera que es minimitzi l'energia interna de deformació. No obstant això, hi ha alguns mètodes basats únicament en aspectes geomètrics o definits com heurístics.

4.2.1 Mètodes més comuns d'optimització topològica

Els mètodes d'optimització topològica coneguts fins ara són els següents:

- **Mètode de l'homogeneïtzació.** Plantejat per Bendsøe i Kikuchi [8], considera que la peça està dividida en cel·les –que tenen un o més forats cadascuna -i, posteriorment a l'optimització, es dimensionen la mida dels forats a partir d'una funció densitat μ que pren valors entre 0 i 1. La Fig. 4.2 mostra una idea del procediment.

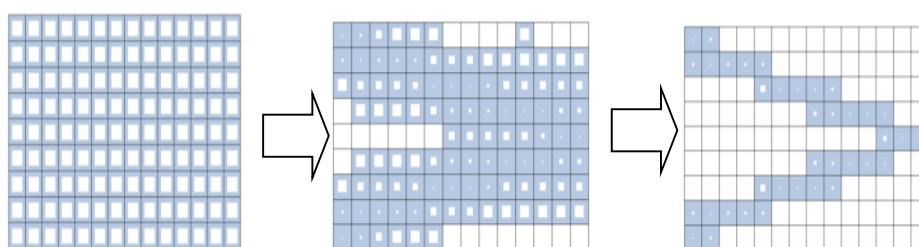


Figura 4.2. Procediment del mètode de l'homogeneïtzació

- **Mètode del material sòlid i isotròpic amb penalització (SIMP).** Aquest mètode és la base del present treball, ja que l'aplica el software Ansys Workbench en el seu mòdul d'optimització topològica. La idea principal és similar al mètode de l'homogeneïtzació però considerant que cada cel·la està totalment plena o buida. També incorpora un valor de penalització p que actua com a exponent de la densitat μ i facilita que tendixin les densitats intermèdies a 0 o 1. Es considera que les densitats de valor 0 són cel·les buides de material, i d'1 estan plenes. A més, s'introdueix un valor llindar el qual tots els valors de densitat inferior al mateix es consideraran 0 i els superiors 1.



Figura 4.3. Exemple d'optimització topològica mitjançant SIMP a Ansys Workbench.
Font:[2]

- **Mètode de l'optimització estructural evolutiva (ESO).** Aquesta metodologia consisteix a eliminar material seguint un criteri de rebuig d'elements. Aquest criteri pot ser segons el punt de vista de les tensions elementals o els desplaçaments. Per exemple, si es pren des del punt de vista de les tensions de Von Mises, s'agafarà el valor màxim obtingut i es mirarà element per element la seva tensió equivalent per veure quin percentatge representa respecte el màxim. En cas de ser superior o igual a un valor de rebuig establert, l'element es conservarà, ja que es considera que la peça en dita zona està prou sol·licitada. Aquest mètode és eficaç però està desactualitzat, avui en dia existeix una versió més consistent anomenada BESO. Tot i això l'apartat 5 estudia el mètode amb un script creat per Ansys.

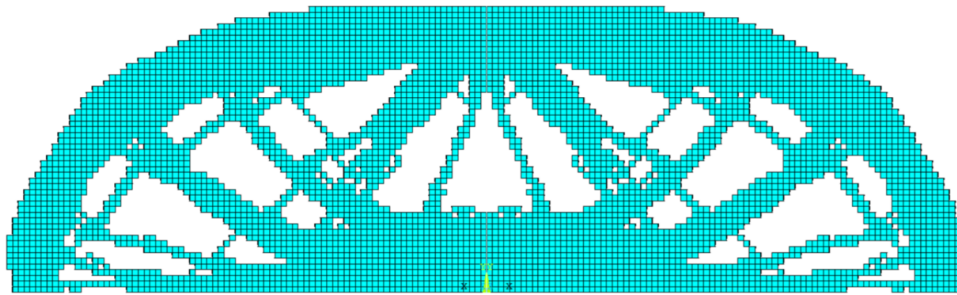


Figura 4.4. Optimització topològica segons el mètode ESO

- **Level Set Method.** Aquest mètode busca la frontera òptima del domini que conserva material, aquesta és la diferència fonamental respecte el mètode d'homogeneïtzació i SIMP. Això s'aconsegueix amb l'optimització d'una funció que caracteritza el problema subjecte a certes restriccions.

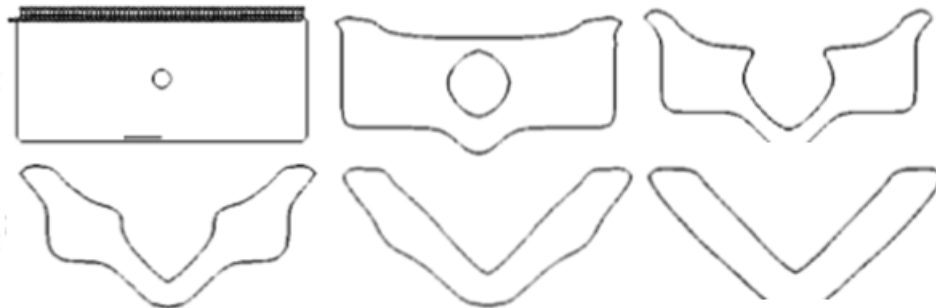


Figura 4.5. Optimització topològica a partir d'iteracions del mètode Level Set. Font: [2]

4.3 Peça d'estudi i assaig experimental

La peça a estudiar durant el treball en la seva totalitat serà un prisma rectangular de dimensions mitjanes 114,52 x 28,93 x 8,44 mil·límetres, feta d'una resina acrílica fotosensible – Resina HT de Spot-A Materials – i fabricada mitjançant la tècnica *Direct Light Processing* (DLP). A la *Fig. 4.6* es pot veure la peça abans de ser assajada.

Com la superfície de la peça ha estat pintada amb un patró de punts, només cal una càmera industrial per capturar tota la seqüència de deformació durant l'assaig i, fent ús del programari ARAMIS GOM, s'aplica el mètode DIC. Aquest consisteix a rastrejar els punts des del moment que la peça no rep esforç, fins que arriba al final de l'assaig. La comparació en la posició és el que determina el camp de desplaçaments de cada punt. En el cas particular estudiat, aquest camp de desplaçaments es poden prendre només dels punts de la frontera per així determinar els interiors amb una simulació en Ansys de desplaçaments imposats.



Figura 4.6. Peça d'estudi feta de resina acrílica mitjançant la tècnica DLP

L'assaig s'ha realitzat al laboratori de resistència de materials. Consistia a aplicar força amb un element de mitja canya en el punt mitjà de la cara superior de la peça que provoqués la deformació de la mateixa amb la restricció de desplaçament que imposaven uns suports a la cara inferior separats 100 mil·límetres. Tant l'element d'aplicació de la càrrega com els suports són peces metàl·liques amb geometria semicilíndrica de diàmetre 15 mil·límetres suficientment rígids com perquè la seva deformació sigui menyspreable. La figura 4.7 mostra de manera descriptiva aquest assaig. La captació d'imatges es realitzava simultàniament al desplaçament vertical de l'element d'aplicació de la càrrega amb una càmera d'alta resolució.

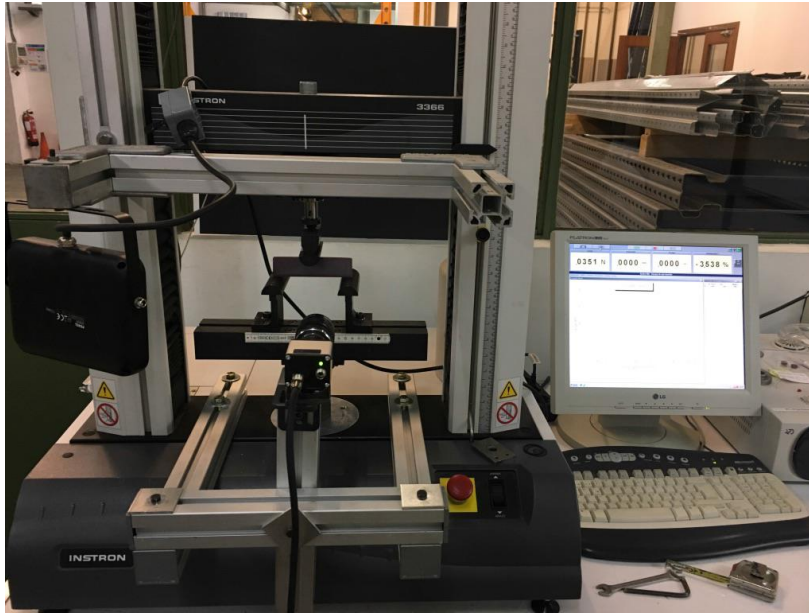


Figura 4.7. Assaig experimental

Les propietats mecàniques que s'utilitzaran per a les simulacions estàtiques són el mòdul elàstic (500 MPa) i el coeficient de Poisson (0,48-0,49), ambdues extretes de [3].

4.4 Optimització mitjançant el mètode dels elements finits en Ansys

4.4.1 Caracterització bàsica: Tipus d'element, mallat i tipus de càlcul

Per a l'elecció de les característiques bàsiques del model d'elements finits, s'han considerat les proposades a [2] per tal d'estandarditzar els resultats i assegurar que siguin rigorosos, és a dir, aproximar al màxim el postprocessat a les peces optimitzades que proposa la literatura d'optimització topològica. En addició, a causa de la limitació del nombre d'elements a la versió estudiantil d'Ansys, és important no sobrepassar el límit, en cas contrari s'hauria de fer ús d'una llicència del programa en ordinadors de potència limitada, fet que incomodaria l'execució de l'estudi. Afortunadament, el model final proposat no presenta cap limitació si es parteix la peça en dos i s'apliquen les condicions de simetria corresponents.

Des del punt de vista mecànic i estructural, el problema es pot definir com a 2D, però com Ansys Workbench no optimitza peces de dues dimensions s'ha de tractar com un problema 3D. L'element de tipus sòlid es considera l'indicat per realitzar totes les simulacions. En concret, el tipus d'element escollit ha estat el Sòlid 185 que presenta 8 nodes per element i 3 graus de llibertat per node.

Durant tot el treball s'han introduït les propietats dels materials sense considerar l'anisotropia

dels mateixos per tal de simplificar l'estudi, la idea final és fer un estudi comparatiu d'optimització topològica, l'anàlisi dels resultats segons les propietats dels materials podria ser un estudi complementari però dista de l'objectiu principal del treball. Considerant aquesta característica material i la no presència de grans desplaçaments, per a les simulacions sense contactes el càlcul és lineal, contràriament a si s'incorporen els elements de suport i l'element d'aplicació de la càrrega. De totes maneres per optimitzar en Workbench cal que el problema sigui lineal, per això sempre es tractarà de convertir els problemes de contactes a càrregues distribuïdes.

A la següent taula (4.1) es mostren les propietats utilitzades pels materials presents a les simulacions:

MATERIAL	Mòdul Elàstic (E)	Coefficient de Poisson (ν)
[MPa/mm²]		
Peça (resina)	500	0.48
Acer (altres elements)	210000	0.35

Taula 4.1. Propietats mecàniques de la peça i els elements de contacte.

Per aquesta peça s'ha definit un mallat inspirat en l'estudi d'un dels treballs predecessors al present, concretament el de [2]. Com l'estudi dels resultats en funció del mallat per aquest tipus de problema ja està realitzat, convé seguir amb la dinàmica proposada, ja que els resultats seran més rigorosos i es podrà fer una comparativa més adequada entre resultats. L'estudi previ proposa un mallat de cent divisions a la base, cinquanta en alçada i una sola divisió en profunditat. Els elements han de tenir una geometria aproximadament de prisma quadrangular i sempre s'ha fet servir el mateix mallat a excepció del present en els elements de contacte d'un dels models que s'han estudiat.

A la següent figura (4.8) es mostra el mallat i defineixen els eixos de coordenades de tots els models:

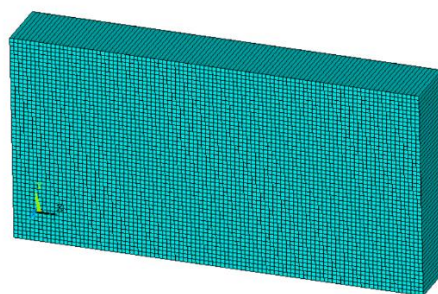


Figura 4.8. Mallat i eixos de tots els models inspirat en [2]

A partir d'aquí es veuran tres models del problema ordenats de menor a major realisme. Concretament, s'estudiaran els següents:

- Model de forces puntuals
- Model de càrregues distribuïdes
- Model realista

4.4.2 Model de càrregues puntuals

El primer model consisteix en optimitzar topològicament la peça a partir de la introducció de les càrregues i condicions de contorn en Ansys Workbench. Aquest model presenta mitja peça i es caracteritza per contenir forces puntuals als nodes superiors on l'element que aplicaria l'esforç i condicions diverses restriccions de desplaçaments en cares i vèrtexs. El motiu de per què es treballa en Workbench és per el detall de que la versió APDL no té mòdul d'optimització

La geometria es fàcilment generable amb l'ús de modelatge 3D, però també es pot exportar el model des del programari Ansys APDL fins la versió Workbench i, així, es transmeten altres dades com la informació dels elements, materials, etc. Un cop importada tota la informació del model, s'ha de garantir que les condicions de contorn siguin les apropiades i, sobretot, que no quedi moviment de sòlid rígid lliure perquè el programa pugui solucionar.

Les condicions de contorn que presenta el model són:

1. Restricció de desplaçaments en la direcció vertical Y nodes situats a 7,26 cm de l'extrem inferior, que representa el suport inferior.
2. Condicions de simetria respecte a la direcció X a la cara que parteix la peça. Això comporta una restricció dels desplaçaments en la direcció X.
3. Restricció del desplaçament en Z d'un dels vèrtexs de la cara inferior per evitar el moviment lliure del sòlid.

Totes les restriccions es poden veure a la *Fig. 4.9*.

Un cop aplicades les condicions de contorn s'apliquen unes forces de 200 N en els vèrtexs superiors i adjacents a la cara del pla de simetria que aproximadament simulen el cas base però considerant l'element d'aplicació de la càrrega com un parell de forces puntuals. En aquest model el valor de les forces no són exactament iguals al cas realista, simplement es busca comparar la peça optimitzada resultant amb els altres i, en ser un model tan simple i lineal, el valor de la força no influeix en l'optimització topològica.

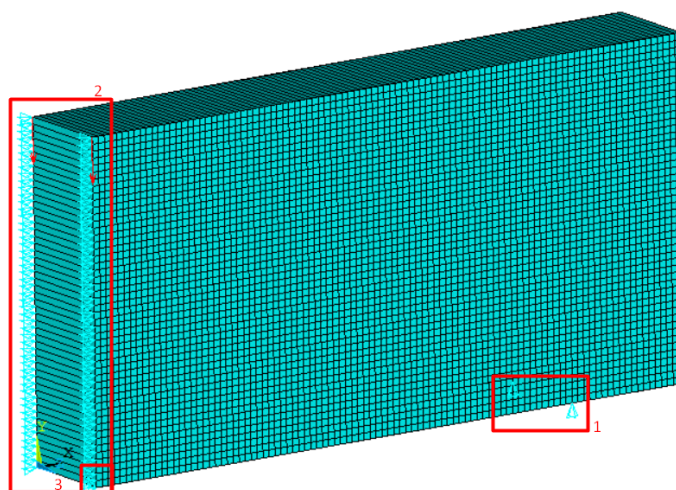


Figura 4.9. Condicions de contorn al model de càrregues puntuals

Un cop solucionat es poden comprovar resultats de tensions equivalents o deformacions a causa de les forces puntuals. No obstant això, la importància dels mateixos regeix en verificar que no hi hagi cap errada en el model, ja que el valor no és l'objectiu sinó el resultat de l'optimització de la peça. A partir de la versió 19.0 d'Ansys Workbench, el mòdul d'optimització ve incorporat de sèrie i s'ha de procedir a continuació de solucionar el problema d'elements finits, el mòdul d'optimització importa els resultats que exporta la simulació anterior. Abans de començar a processar és important introduir un valor de densitat al material, d'altra manera el programa donarà un error i no es podrà executar el mòdul. Realment, el pes propi del material no es té en compte en el càlcul i, per tant, el valor de la densitat és arbitrari.

Després d'aplicar el segon solucionador, el resultat de l'optimització amb retenció d'un 50% del volum i un factor de penalització $p=3$ (veure [2]) és el següent:



Fig. 4.10. Optimització topològica del model de càrregues puntuals

A més, per tots els models es fixarà el valor llindar a 0,6 per tal millorar la comparativa.

4.4.3 Model de càrregues distribuïdes

Aquest segon model es caracteritza per la introducció d'elements de contacte en els models per tal d'obtenir càrregues repartides. La motivació d'estudiar aquest model ha estat voler representar de manera realista els suports i l'element d'aplicació de la càrrega, ja que en el cas realista la peça no ha rebut cap esforç puntual i, a més, es pretén reduir les singularitats numèriques.

Com el mòdul d'optimització topològica només està present en *Ansys Workbench* i la dificultat de modelar els contactes indueix a fer ús de la versió APDL, la relació entre ambdues versions és més estreta en aquest cas. A més cal considerar que l'optimització es realitza a partir de forces o pressions i, per aproximar-ho a l'assaig realitzat en el model realista només es disposen del valor dels desplaçaments, per tant, cal fer un primer processat on es trobin les forces de reacció en els nodes on se situen l'element que aplica la càrrega i suport, o càrregues repartides, i exportar tota la informació d'APDL a *Workbench*.

Primerament, s'ha creat la geometria 3D amb *Spaceclaim* en format IGES considerant la simetria del problema (meitat de la peça, meitat de l'element que aplica la càrrega i només un suport). A continuació amb les eines de "Numbering Ctrl's" s'han fusionat i reparat les entitats com keypoints, línies, àrees i volums per tal de no tenir problemes amb el mallat. Durant aquest preprocessament també s'ha definit un segon tipus de material, un acer amb propietats presents a la *taula 4.2*.

Per modelar els contactes s'ha fet ús del Contact *Pair a Ansys APDL*, el contacte ha estat flexible i s'ha escollit el mètode augmentat de Lagrange, ja que aquest no permet penetració entre les superfícies. Per caracteritzar-lo s'han definit les *contact surfaces* com a superfícies de la peça i les *target surfaces* com les superfícies en contacte del suport i element que aplica la càrrega, el motiu d'aquesta elecció és que en certs contactes les "target" penetren sobre les "contact" i, per tant, les primeres superfícies usualment són les de les peces més rígides. Cal esmentar que inicialment no existeix contacte entre superfícies.

Pel que fa al mallat dels elements de contacte, s'ha ajustat a un nombre no excessivament elevat per tal d'evitar problemes de límit d'elements.

En aquest cas les condicions de contorn són diferents respecte els altres models, concretament s'han aplicat les següents:

1. Restricció dels desplaçaments en Z dels nodes continguts al pla superior de la meitat de l'element d'aplicació de la càrrega.
2. Fixació dels nodes de la superfície inferior al suport.

3. Condicions de simetria, restricció de desplaçaments en X en els nodes continguts al pla de simetria, tant per la peça com per la meitat del l'element d'aplicació de la càrrega.
4. Restricció del desplaçament en Z d'un node del vèrtex inferior.

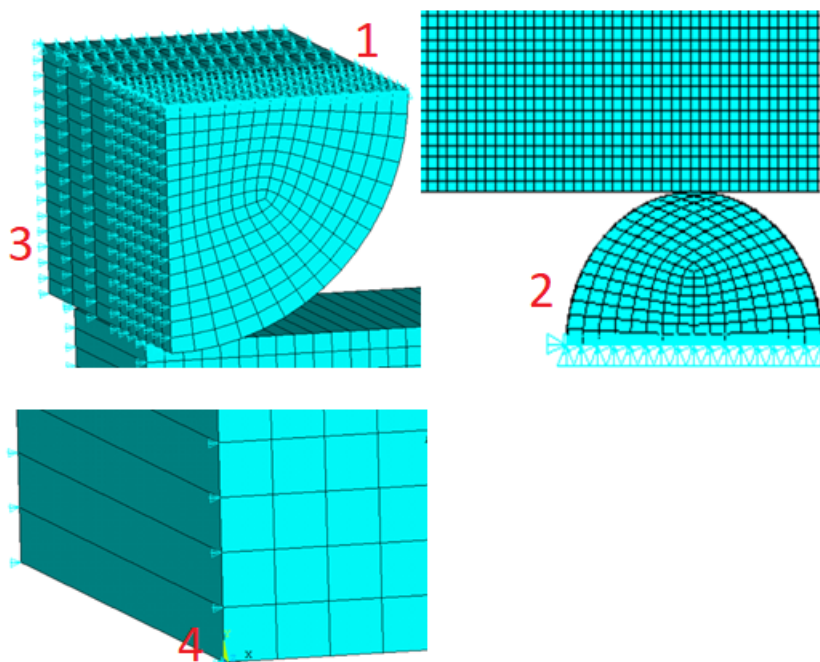


Fig. 4.11. Condicions de contorn al model amb contactes

Com a càrregues s'ha imposat un desplaçament en Y de -8,414 mm dels nodes continguts a la superfície superior de l'element d'aplicació de la càrrega per tal d'imitar el comportament de l'assaig realitzat i connectar els desplaçaments verticals dels nodes inferiors de la peça la simulació amb els de l'assaig. D'aquesta manera, encara que no siguin els desplaçaments iguals en tots els nodes de la peça, es crea una semblança entre problemes i per les optimitzacions posteriors es podran realitzar millor comparatives. Un cop acabat, s'executa la resolució.

El programa itera i resol la solució del problema no lineal. En molts casos és convenient afegir un conjunt de passos intermedis a la solució final però la idea és llegir l'últim pas - el moment que la càrrega està aplicada en la seva totalitat-. Una manera de verificar si els resultats són coherents és fer un gràfic de la deformada de la peça fent ús de les eines de selecció que disposa el programa (*Fig. 4.12*). La idea principal del postprocessat en aquest model és

extreure totes les forces de reacció als nodes de la peça propers a l'element d'aplicació de les forces i suport, ja que teòricament són les mateixes amb signe contrari a les que ha rebut durant l'assaig i ens serveixen per importar-les a un model d'Ansys Workbench amb només la peça, sense elements externs, per poder optimitzar-la topològicament. Aquest procediment es pot dur a terme amb la comanda "NFOR" i diverses tècniques de selecció de nodes per finalment poder generar una llista amb les reaccions. A la Fig. 4.13 es mostren les reaccions gràficament que pretenen simular la càrrega repartida que rep la peça a causa dels suports.

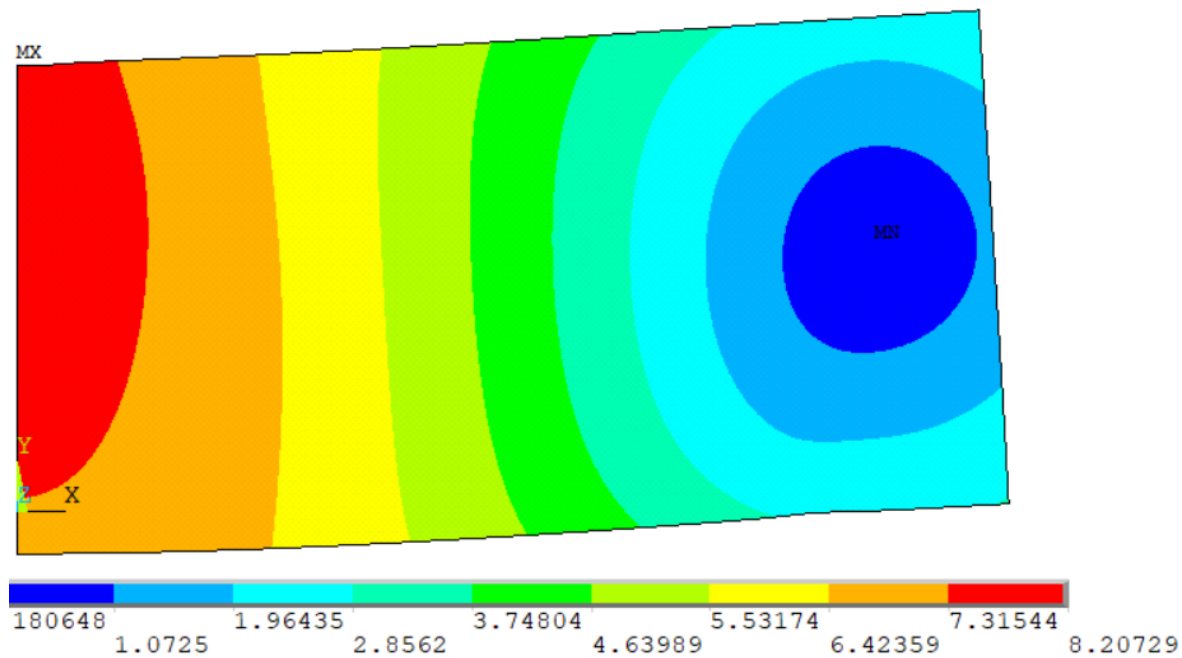


Fig. 4.12. Deformada de la peça principal

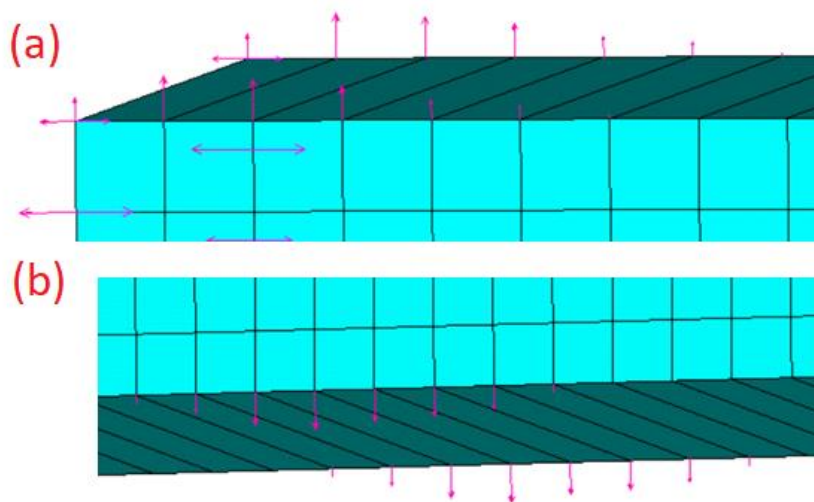


Fig. 4.13. Forces de reacció de la peça a la zona propera a l'element d'aplicació de la càrrega (a) i al suport (b)

Concretament, la llista de forces obtinguda es mostra a la taula següent amb el signe corregit:

Nodes	Fy [N]	Nodes	Fy [N]
77; 5228	-1.5227	152; 5303	-94.231
78; 5229	3.8384	243; 5394	0.75775
79; 5230	30.424	245; 5396	-0.22312
80; 5231	69.675	246; 5397	-17.303
81; 5232	119.75	247; 5398	-54.892
82; 5233	143.18	248; 5399	-78.093
83; 5234	119.46	249; 5400	-130.86
84; 5235	105.91	250; 5401	-157.64
85; 5236	86.134	251; 5402	-176.33
86; 5237	30.461		
87; 5238	-0.51322		

Fig. 4.2. Forces de reacció amb signe corregit als nodes locals

El següent pas és modificar el primer model de forces puntuals a Ansys Workbench i, mitjançant la introducció de “Commands APDL”, s’introdueixen totes les forces en els nodes corresponents amb el següent format:

➔ f, 77, fy, -1.5227. En aquest exemple s’aplica una força al node 77 en direcció Y de -1,5227 N.

També cal eliminar les forces del model anterior i verificar que les condicions de contorn no han variat. Un cop introduïdes totes les càrregues s’executa la solució i es procedeix a realitzar l’optimització topològica. El resultat final es mostra a la figura a continuació:



Fig. 4.14. Optimització topològica del model de càrrega repartida

4.4.4 Model realista

Aquest últim model, que prové de [3], és el més important, ja que donarà resposta a si és viable l'optimització d'una peça a partir de capturar el seu camp de desplaçaments mitjançant la tècnica DIC. La idea principal d'aquest subapartat és optimitzar el procediment i resultats presents a [3] per finalment poder realitzar una bona comparativa.

Primerament s'ha d'executar una macro que genera el model en Ansys APDL de l'assaig, la qual bàsicament crea una geometria, la malla, imposa desplaçaments mesurats experimentalment a tots els nodes del contorn, aplica condicions de contorn i soluciona.

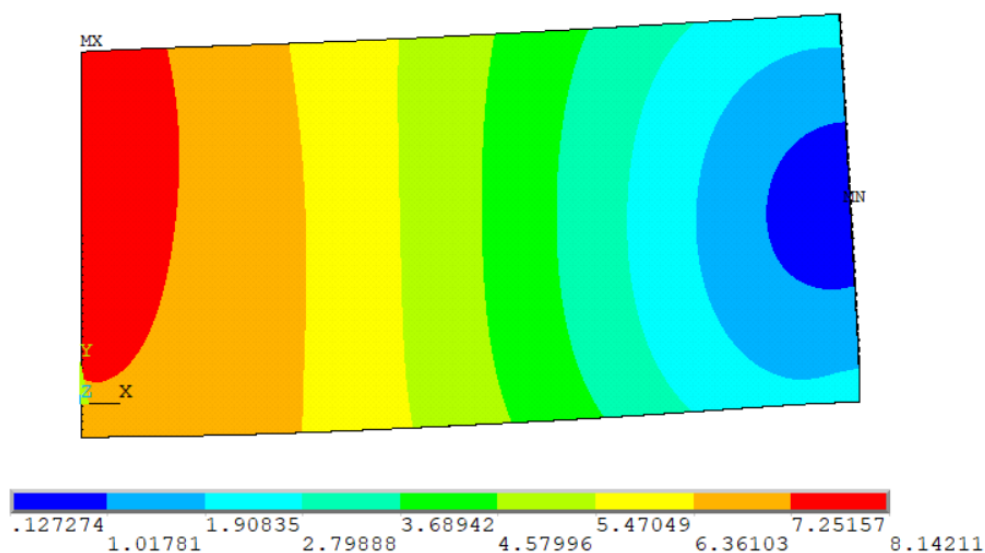


Fig. 4.15. Deformada del model realista un cop solucionat

Tot seguit cal seguir un procediment similar al segon model, simplement s'han d'extreure el valor de les forces de reacció de les zones properes a on se situava l'element d'aplicació de la càrrega i el suport. Forces de reacció hi ha a tot el contorn, però a la realitat, que siguin a causa d'elements externs només són importants les situades a les dites zones. El motiu pel qual existeixen aquestes forces s'ha descobert a les etapes finals del projecte i, bàsicament, és a causa del soroll del sistema de mesura. Existeix una manera alternativa de treure el valor que és fer un llistat de totes i aplicar-ne filtres de valor, per tal que es rebutgin els nodes amb forces de reacció menyspreables. No obstant això, la manera més efectiva i ràpida és seguint el procediment del segon cas (model amb contactes).

Si s'optimitza la peça a partir de totes les forces de reacció amb el signe corregit, el resultat seria el present a la següent figura (4.16):



Fig. 4.16. Primera versió de l'optimització topològica del model realista

Existeix una semblança amb els altres models però no sembla ser una solució del tot consistent. Per aquest motiu és necessari filtrar les forces que no intervenen en el problema real, ja que s'acaben cancel·lant amb altres de signe oposat i les forces amb valor poc significatiu que simplement són solucions numèriques que no aporten pes a l'optimització.

Un cop filtrades les càrregues s'han considerat dos casos. El primer és negligir les reaccions en les direccions X i Z i, per tant, considerar que la càrrega es completament vertical. L'optimització topològica es mostra a continuació (Fig. 4.17):



Fig. 4.17. Optimització topològica del model realista considerant només forces Y exteriors

El segon cas consisteix a incorporar les forces en direcció X amb motiu de la geometria de l'element d'aplicació de la càrrega i suport. El resultat seria el següent:



Fig. 4.18. Optimització topològica del model realista considerant forces X i Y com exteriors

Com ambdues solucions són molt semblants, s'ha pres de manera arbitrària el cas de forces en direcció Y. A partir d'aquí ja es pot realitzar la comparativa entre els tres models.

4.4.5 Anàlisi i comparativa de resultats entre models

Amb motiu de la dificultat de superposar tres imatges i poder llegir-ne el resultat, les comparacions entre els resultats s'han de fer dos a dos. Essent la primera una comparativa entre el primer model i el segon per veure com influeix l'aparició d'una càrrega repartida front una puntual i, tot seguit, les dues restants que pretenen donar validesa al model realista.

Abans de procedir és convenient establir un codi de colors. A la següent figura es mostren els resultats de la peça sencera amb el seu color corresponent:

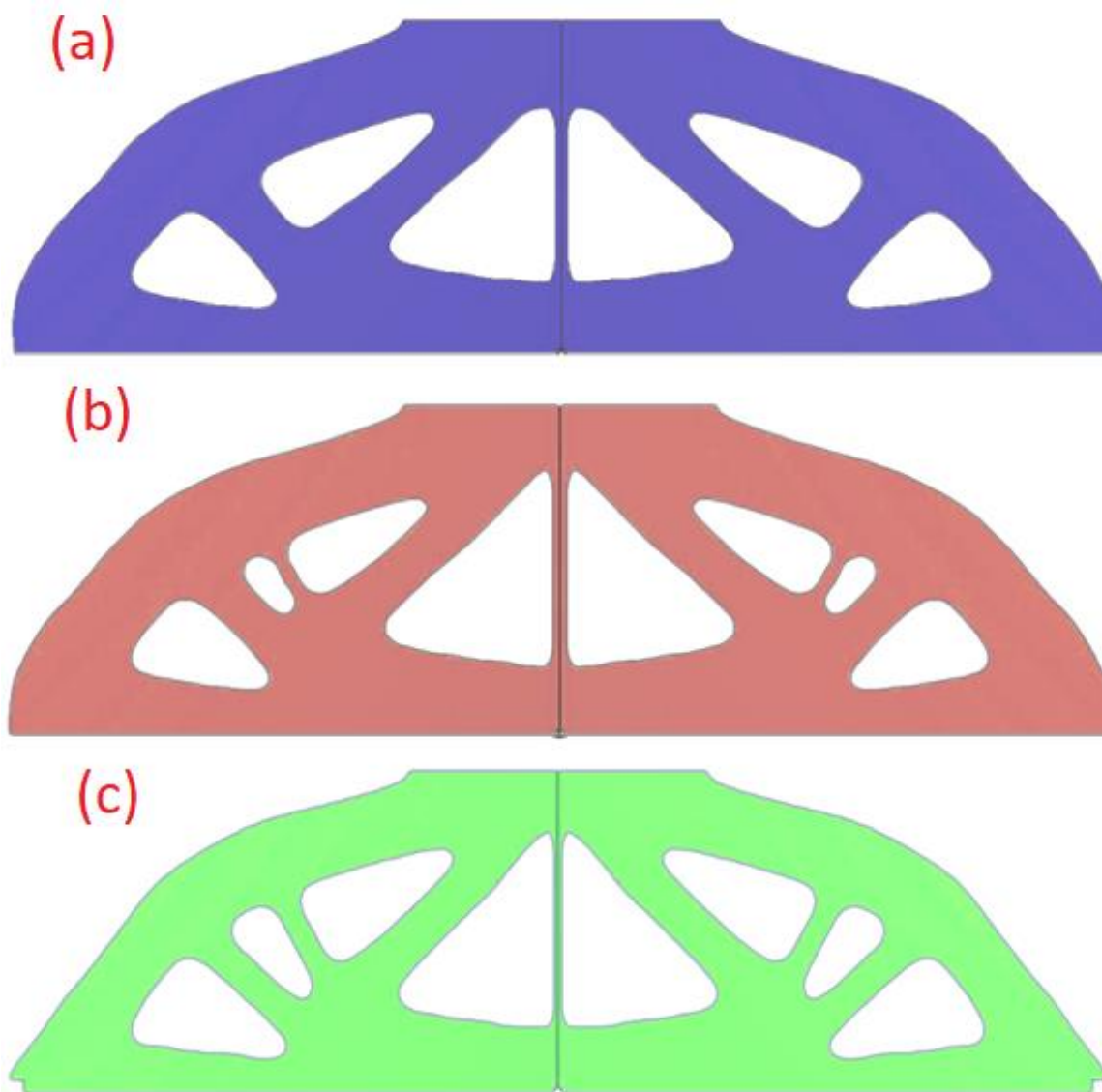


Fig. 4.19. Optimització topològica amb el codi de colors que representa el model (a) de forces puntuals, (b) de càrrega repartida i (c) realista

El material no extret en el forat central és a raó de no haver desactivat l'opció de conservar material als nodes amb condicions de contorn. Tanmateix, no és important a l'hora de fer la

comparativa.

Model de càrregues puntuals vs. model de càrrega repartida

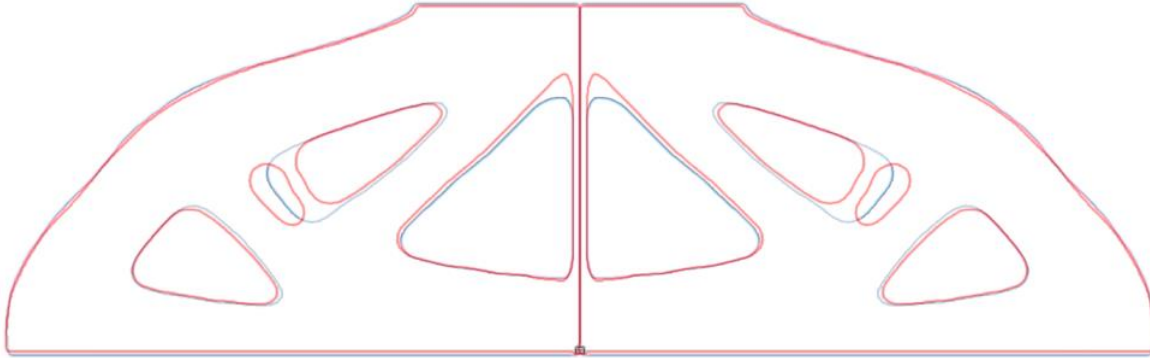


Fig. 4.20. Comparativa de càrregues puntuals vs. Càrrega repartida

A primera instància els resultats dels models completament simulats amb Ansys són molt semblants. En ambdós casos les fronteres i els forats més propers als suports són pràcticament coincidents. La diferència més significativa se situa en el forat intermedi que genera en cada meitat de la peça, concretament en el cas de la càrrega repartida genera dos forats mentre que per la càrrega puntual només en genera un. No obstant això, segueix donant un traçat molt similar i les diferències pel que fa als resultats de deformacions i tensions no són significatives. Aquesta comparativa serveix per verificar que el model de càrrega repartida i forces puntuals resulten en una optimització quasi idèntica.

Model de càrrega repartida vs. model de realista

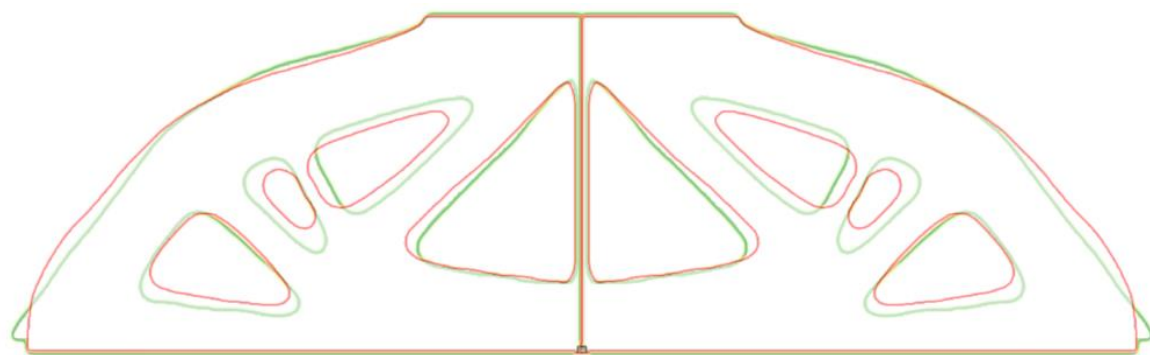


Fig. 4.21. Comparativa de càrrega repartida vs. Model realista

Visualment es pot comprovar que el nombre de forats que genera són iguals, això és

conseqüència directa d'ambdós ser models amb càrregues repartides. De totes maneres, el model realista genera uns forats més grans - a excepció del central - i un contorn similar però no idèntic. Igualment, les diferències poden ser causades pels diferents valors de forces aplicades i, com el resultat és tan similar, es pot confirmar que amb l'ús de tota aquesta metodologia que parteix de la tècnica DIC, passa per uns filtres en les forces de reacció i arriba fins a la peça optimitzada, es poden obtenir resultats completament vàlids.

5 Evolutionary structural optimization (ESO)

5.1 Introducció i definicions

El mètode ESO és una de les maneres més populars per optimitzar una peça continua i parteix d'un concepte molt simple sobre el que es podria entendre com a optimització topològica. El mètode que utilitza el mòdul d'Ansys Workbench és pròpiament d'optimització, mentre que l'ESO és definit com a heurístic. La idea és analitzar cada element i veure si es troba sol·licitat o no segons uns criteris establerts, en cas afirmatiu l'element s'hauria de conservar en la peça i, en el cas contrari, s'hauria d'eliminar de la peça. Per això i inspirant-se en el llibre [6], hi ha dos punts de vista per establir tal criteri, el que analitza les tensions equivalents mitjanes i el que utilitza el valor dels desplaçaments d'aquest. El concepte és molt similar, pel mètode *ESO based on stress level* es defineix un element com a sol·licitat aquell que el quocient de la seva tensió equivalent de Von Mises mitjana amb la màxima en tots els elements de la peça superi un valor llindar.

La idea d'aquesta metodologia és fer un procés gradual on es vagin eliminant elements en cada iteració i solucionant amb les mateixes condicions però amb l'absència d'aquests, així obtenir nova informació sobre quines regions tindran un major nivell de tensió i quines podran ser eliminades en la següent iteració. A més, de manera simultània, el valor llindar s'anirà incrementant per eliminar cada cop més material. El procés acaba quan s'assoleixi un percentatge de volum desitjat.

A partir d'aquest mètode en van derivar altres més actualitzats, ja que inicialment hi havia molts científics que qüestionaven els resultats de l'ESO perquè a les seves primeres versions l'algorisme no estava del tot elaborat. La versió de l'ESO enfocada en els desplaçaments – o *Displacement Optimization (DO)* – presenta un algorisme més complex i en fa ús de les matrius de rigidesa i desplaçaments, fet que complica la creació d'una macro en *Ansys*.

Un exemple de DO extret de [6] seria el de les figures següent:

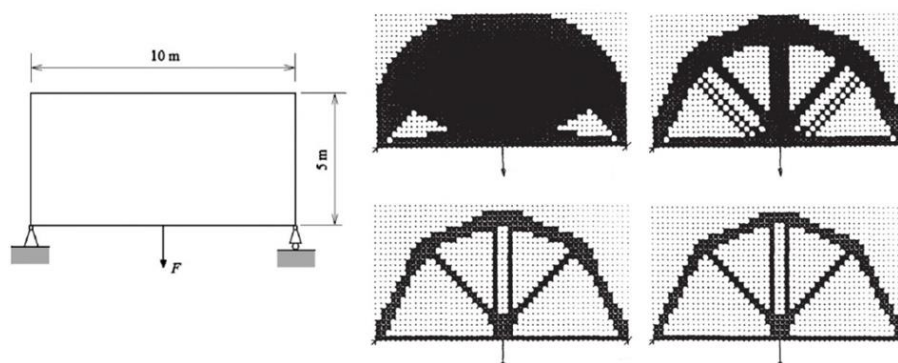


Fig. 5.1. Exemple de DO a través de les iteracions

La versió més completa d'aquesta idea d'optimització s'anomena *Bidirectional Evolutionary Structural Optimization* (BESO) que, a diferència del seu antecessor, pot afegir material a cada iteració. Aquest fet permet corregir zones que no haurien d'haver sigut eliminades, ja que en iteracions posteriors és possible que tinguin un alt nivell de tensió. En definitiva, els resultats que ofereix el BESO són notablement millors que els de l'ESO sobretot a mesura que augmenta la complexitat del problema. A la tesi doctoral [7] es va fer un estudi i es va confeccionar una macro per Ansys 11. No obstant això, el present estudi serà sobre la viabilitat de la metodologia ESO basada en el nivell de tensió per tal de disposar d'una manera alternativa en Ansys per fer optimitzacions topològiques. La següent figura mostra un exemple del BESO extret de [7]:

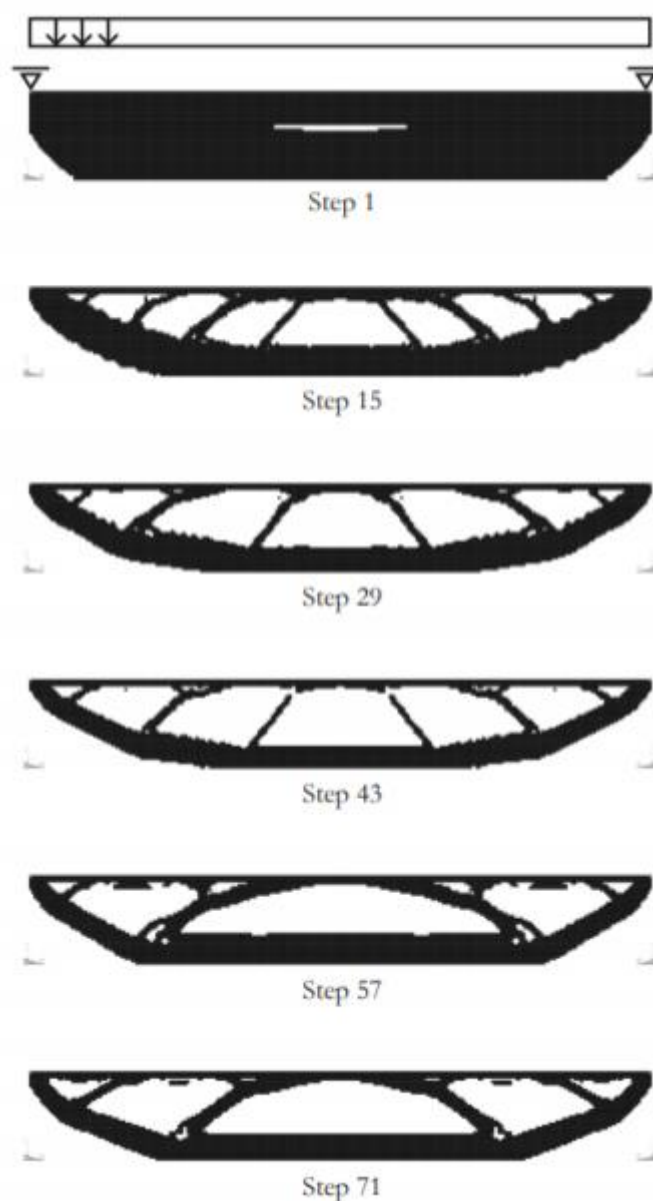


Fig. 5.2. Exemple de la metodologia iterativa BESO extret de [7]

5.1.1 Procediment matemàtic

El mètode de resolució és iteratiu i cal indicar cada iteració amb el subíndex “i”. Cadascuna representa un “solve”, és a dir, un nou estat de tensió assolit després d’haver eliminat elements a la iteració anterior –a excepció de la primera, que bàsicament és la resolució del problema amb la peça sencera-. El programa al resoldre dona el valor de tensions equivalents nodals que, posteriorment, s’han de transformar –mitjançant mitjanes- en elementals (Eq. 5.1). Aquests es comparen amb el valor de tensió màxim a tot el model i es rebutja si el quocient d’ambdós és inferior a la ràtio de rebuig (RR_i) de la iteració *i* present (Eq. 5.2). S’entén per rebuig d’un element com a l’acció d’eliminar-lo del model –en Ansys la comanda més apropiada és *ekill*-, així es considera aquell element com absent de material. Abans de tornar a solucionar cal incrementar la ràtio de rebuig (RR) perquè el programa no es quedi estancat, concretament s’escull un *evolutionary rate* (ER) i se li suma al RR de la iteració actual per definir el de la següent (Eq. 5.3). Finalment se soluciona el problema de nou amb els elements eliminats i es segueix el procés de manera iterativa tantes vegades com interressi, el límit l’estableix l’usuari i és habitual considerar un percentatge de volum a conservar com a criteri per acabar problema.

$$\sigma_e^{vm} = \sum \sigma_{node}^{vm} \quad (5.1)$$

$$\frac{\sigma_e^{vm}}{\sigma_{max}^{vm}} < RR_i \quad (5.2)$$

$$RR_{i+1} = RR_i + ER \quad (5.3)$$

$$V_{conservat} = V_{total} - V_{eliminat} \quad (5.4)$$

Algorisme

- 1) Fixar valors de RR₀ i ER.
- 2) Obtenir la primera solució del problema (tensions equivalents de Von Mises nodals) i transformar-la a elementals (Eq. 5.1).
- 3) Eliminar elements segons el criteri de (Eq. 5.2).
- 4) Incrementar la ràtio de rebuig per a la següent iteració (Eq. 5.3).
- 5) Si el percentatge de volum eliminat supera a un límit establert, s’ha arribat a la solució final. En cas contrari cal solucionar de nou i retornar al punt 2.

Existeixen moltes versions de l’ESO. Un exemple seria el fet de mantenir una ràtio de rebuig constant a les iteracions fins que el programa deixés d’eliminar elements, fet que comportaria augmentar la ràtio. No obstant això, pel present projecte s’ha decidit augmentar RR amb cada iteració per així seguir amb la tècnica que s’està estudiant actualment a experimentació.

5.2 Algorisme en Ansys APDL

5.2.1 Resum del model d'elements finits

Tipus d'element:	Sòlid 185 (3D, 8 nodes per element)
Nombre de nodes:	10200
Nombre d'elements:	4950
Material:	Resina ($E=500\text{ MPa}$; $\nu=0,48$)
Càrregues:	Càrrega repartida de la taula 4.2
Condicions de contorn:	Mateixes que a l'apartat 4.4.4

5.2.2 Explicació detallada del codi

El programari Ansys incorpora un llenguatge intern de programació per facilitar i alleugerar l'ús del mateix amb la creació de macros. A més, amb el suport de l'eina *help*, es poden trobar un conjunt de funcions predeterminades i les seves explicacions. En general fer codis és intuïtiu i només es requereix un programa que pugui editar text, també es pot fer ús de l'arxiu *log* -que actualitza Ansys a cada sessió- per copiar línies d'ordres desconegudes, ja que aquest enregistra cada acció que es pren i la codifica.

No obstant això, pel fet de ser un llenguatge propi no està gaire optimitzat i, per tant, l'execució d'una macro complexa pot resultar en una llarga espera fins que finalitzi. En addició, no hi ha cap mecanisme eficaç per saber, en cas d'error, a quina línia s'està produint l'errata.

El codi de la macro està conformat primerament per unes línies que obtenen informació i n'aporten de nova al model, tot seguit hi ha diversos bucles i formats condicionals que processen tota la informació ordenadament.

IMPORTANT: El punt de partida per executar la macro és després del primer *solve* amb tot el model prèviament generat. Als annexos 1 i 2 estan les macros senceres de generació de geometria i optimització topològica (ESO) respectivament. Encara que a continuació es farà una descripció detallada de tot el codi.

```

fini
itmax=56
RRi=1
ER=1
RR=RRi
final=0.5
killed=0
*get,ne,elem,,num,max

```

La primera part de la macro serveix per fixar els límits de l'optimització i per obtenir certa informació important del model. El paràmetre *itmax* és el nombre d'iteracions màximes que es desitja, és convenient deixar un número elevat, ja que el programa parará abans pel criteri de material eliminat. En canvi, *RRi* és la ràtio de rebuig inicial, el valor és arbitrari però en molts exemples de [7] es comença amb un valor petit, per això un 1% és coherent. Pel que fa a la ràtio

evolutiva *ER* també serveix la mateixa idea, un valor petit pot fer més llarg el processament però, alhora, donar resultats més consistents, per aquesta raó un 1% d'increment del *RR* és adequat. També s'estableix el percentatge final de peça a retenir, per continuar amb l'estudi del quart apartat s'ha establert del 50%. També s'ha inicialitzat amb valor nul una variable anomenada *killed*, que definirà el nombre d'elements eliminats. Finalment s'obté el nombre d'elements del model i s'emmagatzema en el paràmetre *ne*.

```

*DIM,vme,array,ne
*do,i,1,ne,1
vme(i)=1
*enddo

```

Abans de començar amb els *loops*, es crea una variable anomenada *vme* del tipus *array* – que bàsicament és una matriu columna de tantes files com elements hi hagi en el model – amb inicialment valor 1 que emmagatzemarà els valors de les tensions de Von

Mises mitjanes a cada element. S'observa que cada valor particular està posicionat segons l'enumeració que dóna Ansys a l'element.

```

*do,ite,1,RRf,1
allsel
fini
/post1,

*do,i,1,ne,1
esel,s,elem,,i
nsle,s,
*if,vme(i),GT,0,then
    *get,n1,node,,num,min
    *get,sumseq,node,n1,s,eqv
    *do,j,1,7,1
    *get,n2,node,n1,nxth
    *get,seqve,node,n2,s,eqv
    sumseq=sumseq+seqve
    n1=n2
    *enddo
    vme(i)=sumseq/8
*endif
*enddo

```

Un cop acabada la primera part, comença el primer bucle iteratiu que teòricament acabaria a la iteració màxima *RRf* però com es veurà a continuació es cancel·larà abans. Seguidament d'un conjunt de comandes que assegurin al programa estar movent-se per on toca, comença un segon bucle que conforma un recorregut per tots els elements. La idea principal és també modificar els valors del vector *vme*, per això selecciona l'element *i*, mira si en l'*array* el seu valor és nul i, en cas contrari, calcula el valor de tensió equivalent mitjà de l'element a partir d'un subrecorregut pels nodes d'aquest. En cas de ser nul no hi haurà cap modificació, això és a causa de les limitacions de la metodologia ESO, que tot element eliminat no es pot recuperar. L'enumeració de nodes gairebé mai és contínua en un model 3D, per això se'n fa ús de la comanda “*get,n2,node,n1,nxth”, aquesta obté el número del node següent dintre de l'element prèviament seleccionat i un primer número de node. La mitjana es fa de manera aritmètica i s'emmagatzema a la posició *i* del recorregut dels

elements.

```

allsel
eplot
fini
/solu
nropt,full
*VSCFUN, seqvmax, max, vme

```

Abans de continuar amb el següent recorregut, es tornen a seleccionar totes les entitats del model, s'obre l'apartat de solució, s'activa el *nropt* -ja que en cas contrari no deixarà eliminar elements per aquest mètode- i s'obté el valor màxim de tensió de l'*array vme*, el qual s'emmagatzema en *seqvmax*.

```

newk=0
*do,k,1,ne,1
a=100*vme(k)/seqvmax
*IF,a,LE,RR,then
    *GET, al, elem, k, ATTR, LIVE
    *if,al,eq,1,then
        ekill,k
        newk=newk+1
        vme(k)=0
    *endif
*endif
now=(ne-killed-newk)/ne
*IF,now,LE,final,exit
*enddo
killed=killed+newk

```

El procediment d'eliminació d'elements és simple, bàsicament calcula una variable *a* en tant per cent inspirada en Eq.5.2 i es compara amb la ràtio de rebuig actual. En cas de complir el criteri per ser rebutjat, s'aplica la comanda *ekill* de l'element *k*. Si l'element ja ha estat exclòs anteriorment, s'executarà la comanda per tal d'optimitzar el codi –per això s'utilitza un segon format condicional que mira si l'element a eliminar es troba viu en l'actual iteració-. A banda d'això, se li assigna el valor nul a la posició corresponent de l'element a la variable *array* de tensions equivalents. També es quantifiquen el nombre d'elements eliminats en aquesta iteració en la variable *newk* amb motiu de poder sortir del bucle en cas d'incomplir les situacions finals desitjades. Per concloure amb aquesta secció cal actualitzar el valor de *killed*, definit com a elements eliminats a iteracions

anterior i els que s'eliminen a la present.

```

ESEL,ALL
ESEL,s,LIVE
eplot

```

Per poder visualitzar la figura en cada iteració és convenient introduir en aquesta part un *eplot* amb els elements vius seleccionats prèviament. Aquesta també mesura funciona com a detector de possibles errors.

```

finalsi=(ne-killed)/ne
*IF,finalsi,LE,final,exit
allsel
solve
RR=RR+ER
*enddo
ESEL,ALL
ESEL,s,LIVE
eplot

```

Tot seguit, cal sortir del bucle en cas que el volum conservat sigui inferior o igual al valor que es desitgi –en el present estudi és el 50%-. Això és possible amb l'ús d'una variant del format condicional. A més cal acabar la iteració amb un *solve* i, posteriorment, actualitzar el valor de la ràtio de rebuig *RR* (Eq. 5.3).

Ja només resta acabar amb el bucle general de les iteracions i afegir algunes comandes de selecció i visualització dels resultats.

5.3 Anàlisi de resultats

5.3.1 Estudi de sensibilitat

La problemàtica principal de la metodologia ESO és la influència sobre el resultat final dels valors assignats als paràmetres RR inicial i ER. L'efecte sobre el resultat final és tan gran que d'ells depenen del fet d'obtenir una solució coherent o no poder solucionar. A més, la geometria del material extret també varia en funció d'ambdós, per això és necessari realitzar un estudi de sensibilitat per veure el comportament dels resultats finals.

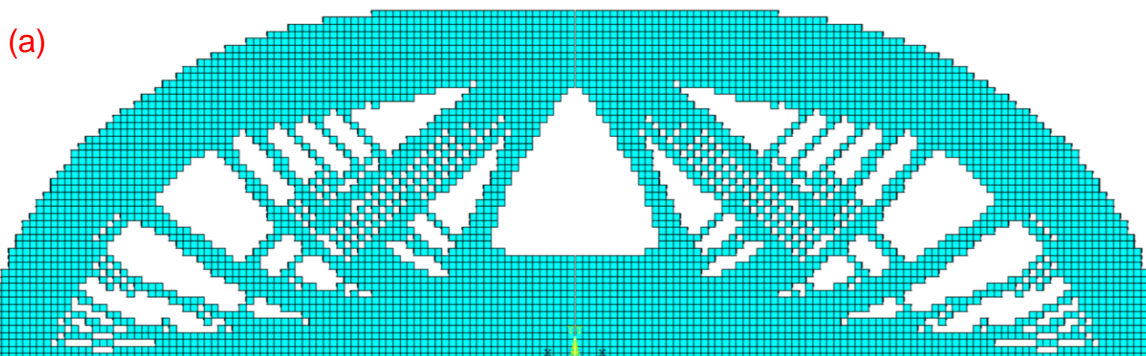
A banda d'això, aquest apartat pretén ser una exposició dels resultats que es poden obtenir mitjançant l'ESO i s'aportaran conclusions respecte a la influència dels seus paràmetres principals.

Finalment s'ha considerat, per a totes les simulacions, que el percentatge de volum retingut hauria de ser igual al de l'apartat 4, és a dir, del 50%.

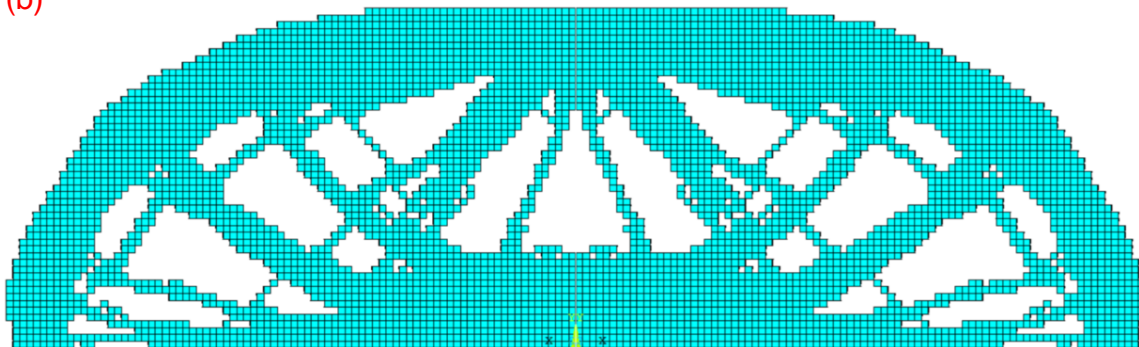
Influència del ER

El paràmetre ràtio evolutiva és el més rellevant si s'utilitza un RR_0 coherent. Això és a causa que si l'ER és baix, l'eliminació es farà pràcticament element per element, i el programa decidirà si rebutjar o conservar en un estat molt similar a l'anterior. El procés serà més lent per l'augment en el nombre d'iteracions i es poden evitar problemes de no convergència dels resultats, ja que si ER és molt gran, el RR pot augmentar tant que elimini tant material que divideixi la peça en trossos o es passi del percentatge de volum desitjat.

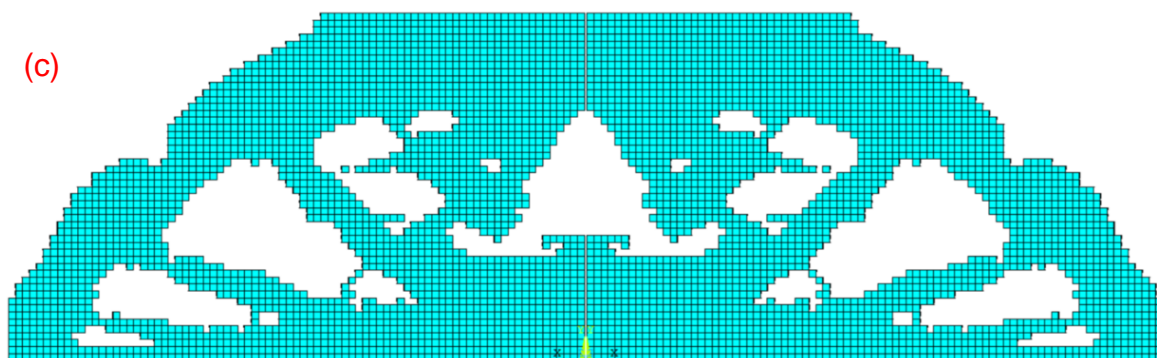
Per aquest motiu l'estudi fixarà el valor de RR_0 en 1% i s'observaran tots els resultats per ER en el rang de valors comprès entre 0,1 i 2. S'han escollit aquests límits, ja que per una banda 0,1 en aquest problema és un valor molt baix que comporta un número de 103 iteracions per acabar obtenint l'estat final i per l'altra els resultats deixen de tenir semblança amb els d'Ansys Workbench a partir de 2.



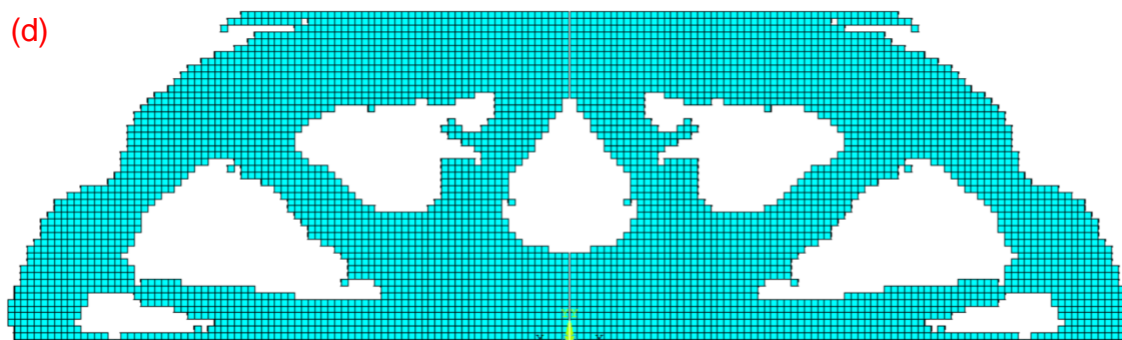
(b)



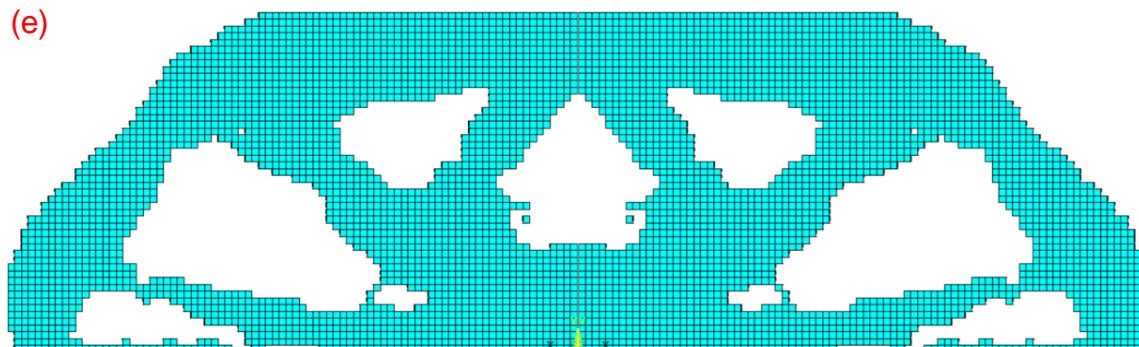
(c)



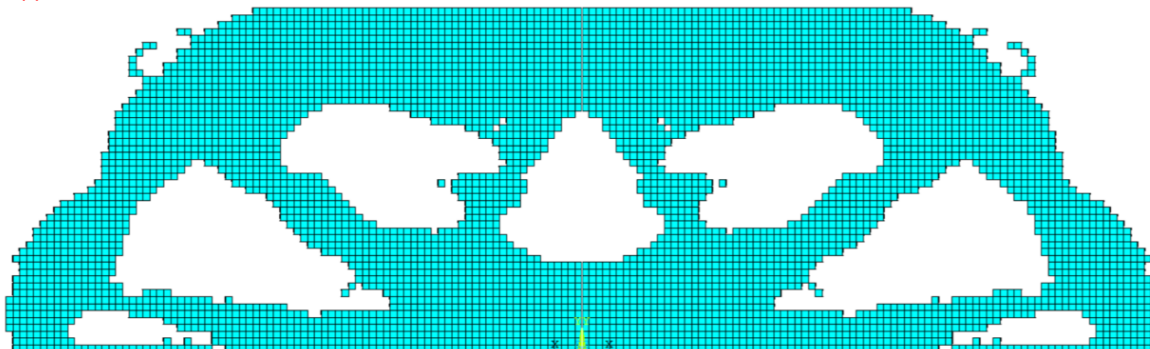
(d)



(e)



(f)



(g)

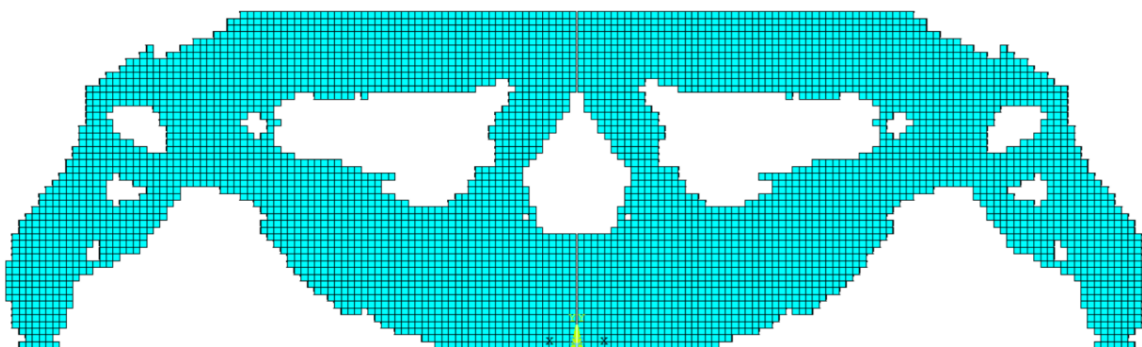


Fig. 5.3. Optimització topològica (ESO) amb retenció del 50% del volum fixant $RR_0=1\%$ i ER del (a) 0,1% (b) 0,5%, (c) 0,75%, (d) 1%, (e) 1,25%, (f) 1,5% i (g) 2%.

Les figures mostren com per valors molt baixos d'ER (*Fig. 5.3 a i b*) es formen geometries molt més polides i contínues, encara que els forats tenen geometries complexes que dificultarien el procés de fabricació. A més, hi ha elements morts envoltats completament d'altres que no ho estan, aquest fet és coherent des del punt de vista matemàtic però no des del funcional.

Per contra, a mesura que va augmentant ER es perd aquesta curvatura quasi perfecta dels elements frontera però el traçat dels forats interiors comença a ser el mateix que en els models presentats a l'apartat 4 (*Fig. 5.3 c i d*).

En el rang d'ER superior a l'1% és on s'obtenen millors resultats pel que fa a la geometria dels forats. L'únic inconvenient és que a mesura que augmenta ER s'elimina més material de la zona propera als suports i allunya el resultat dels obtinguts amb l'Ansys Workbench (*Fig. 5.3 e i f*). Es pot comprovar que per un valor del 2% ja s'ha extret excessivament material de la

zona inferior i, per tant, ja no és d'interès (*Fig 5.3 g*).

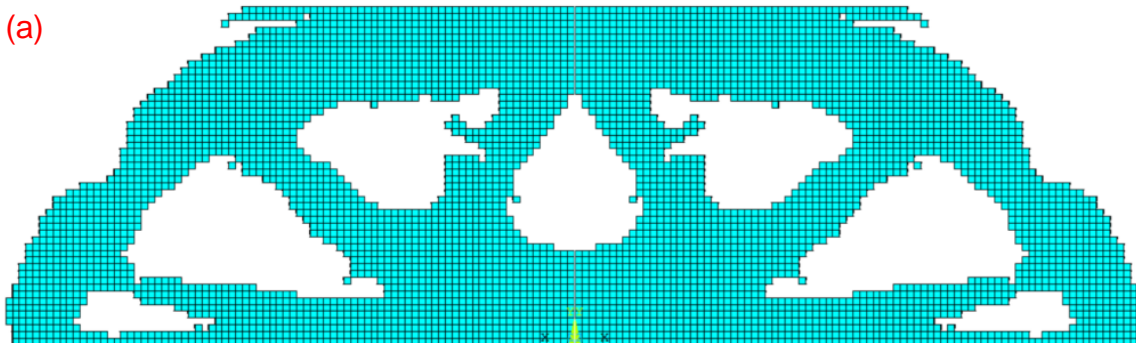
Per concloure, un valor d'1% és bastant adequat per aquest problema i per aquesta raó és el que s'utilitzarà en propers apartats a no ser que s'indiqui. Amb això es verifica que la influència del paràmetre ER és molt significativa pels motius següents:

- Si ER és molt petit, les geometries resultants són més polides i contínues, concretament als elements perifèrics. També augmenta molt el nombre d'iteracions i la geometria dels forats interiors és massa complexa.
- Si ER augmenta i és inferior a la unitat es va perdent la perfecció anterior però els forats comencen a prendre formes similars als que ofereix l'optimització en Workbench.
- En el rang comprès entre 1% i 1,5% els elements perifèrics ja no tenen una forma ben definida però els forats tenen un millor traçat.
- Al voltant del valor del 2% es creen forats propers als suports que separen massa els resultats respecte als obtinguts en Workbench.

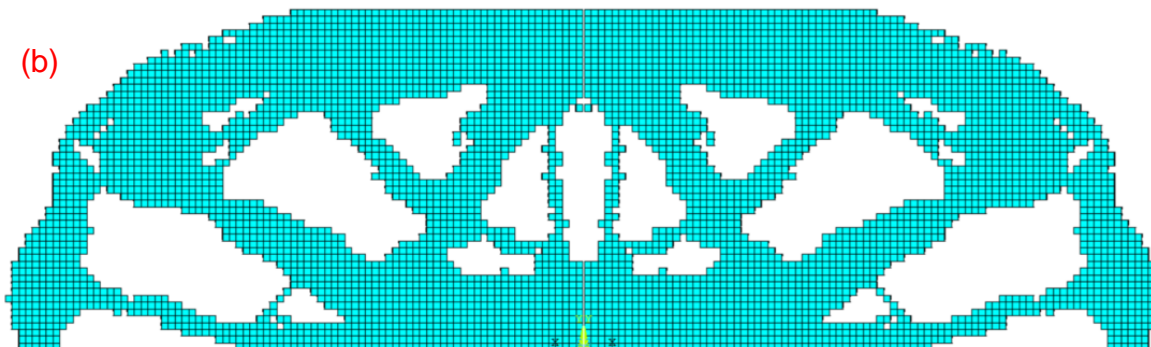
L'estudi de sensibilitat sobre el paràmetre ER ha servit per fixar-lo en 1%. A més, als problemes plantejats a [6] sempre se'n fa ús del mateix valor, per això serà el valor present en els propers apartats a no ser que s'indiqui el contrari.

Influència del RR_0

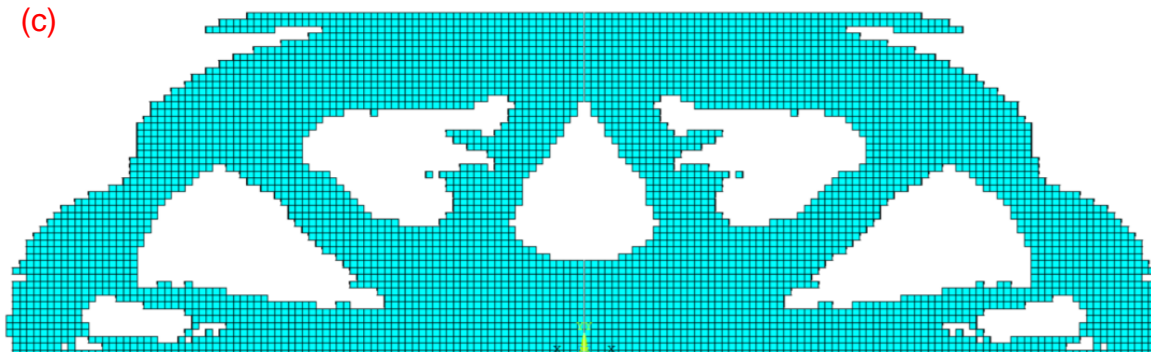
A primera instància, és evident que un canvi en la ràtio de rebuig inicial provocarà que s'elimini més o menys material a la primera iteració. En efecte, si s'augmenta el RR_0 – independentment del valor de ER – el programa a la segona iteració partirà des d'un estat de tensió d'una peça amb forats més grans i, per tant, el resultat final serà diferent. Contràriament, si el RR_0 es considera baix, la seva influència serà mínima, ja que l'evolució del RR a les iteracions serà la que marcarà la geometria a la peça final en començar des de la peça sencera sense haver rebutjat gaire material. És important tenir en compte que si el RR_0 és excessivament elevat, el programa pot arribar a eliminar tant material que allunyi la simulació del problema real i, a més, dividir la peça en trossos.



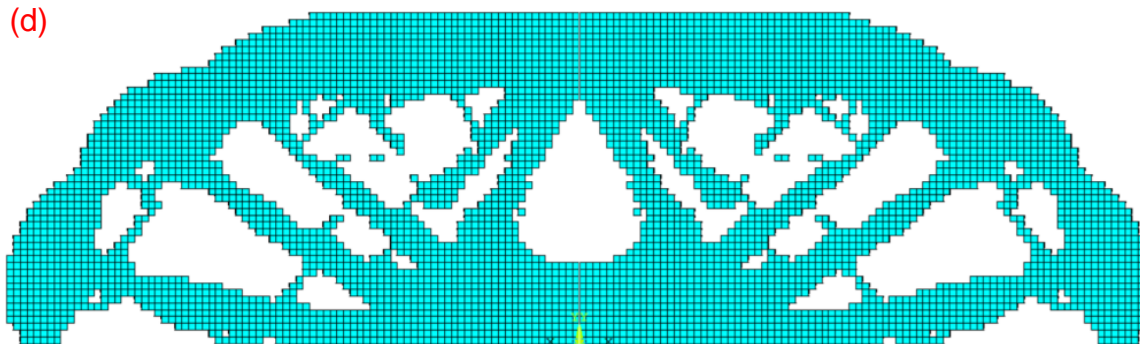
(b)



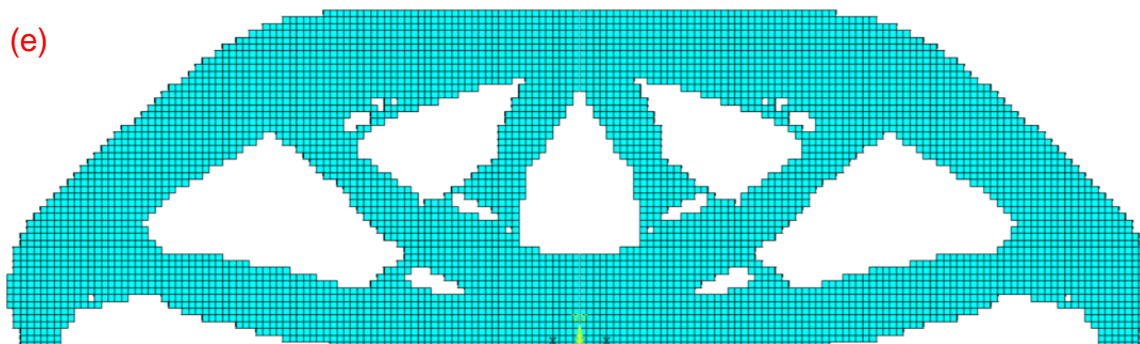
(c)



(d)



(e)



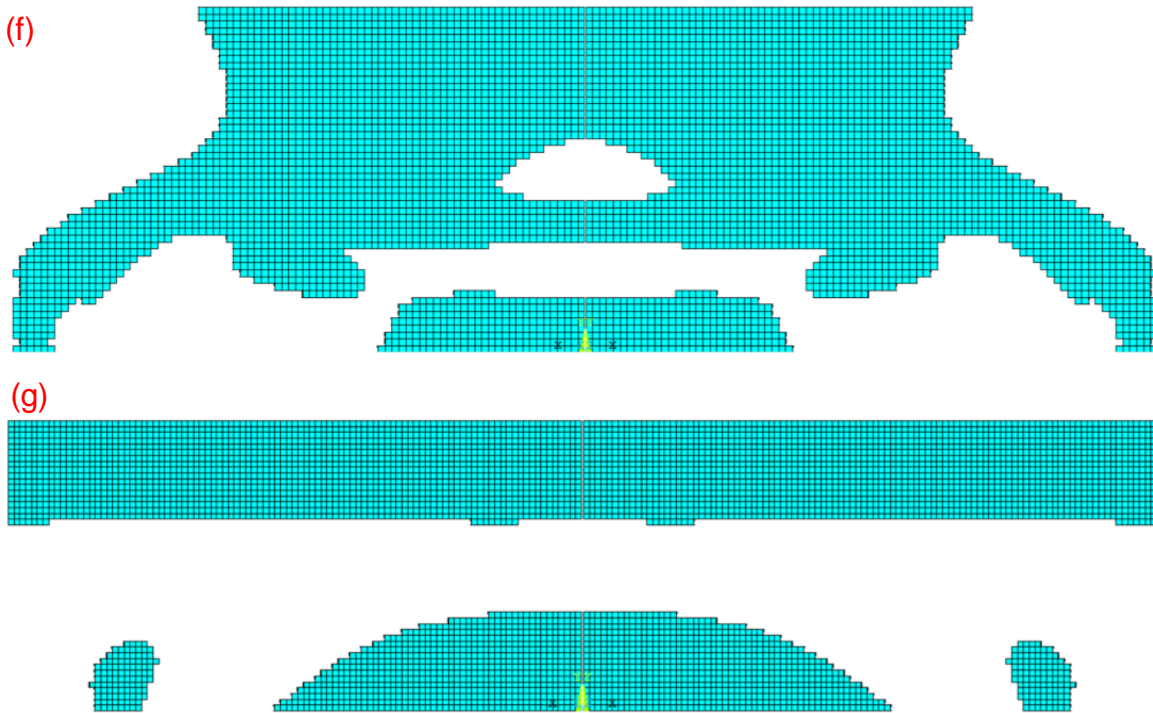


Fig. 5.4. Optimització topològica (ESO) amb retenció del 50% del volum fixant $ER=1\%$ i RR_0 del (a) 1% (b) 2%, (c) 4%, (d) 5%, (e) 6%, (f) 7,5% i (g) 10%.

Amb el conjunt de figures queda demostrat que el paràmetre RR_0 , com també ER , també té una repercussió important sobre el resultat final. Tant és així que amb un valor elevat la solució deixa de tenir sentit. El paràmetre no té importància si i només si es troba en un rang de valors petits inferiors a la unitat, en cas contrari acaba resultant en resultats completament diferents. A mesura que augmenta hi ha tendència a eliminar material per la part propera als suports, fet que no acaba d'interessar per la configuració del problema.

El cas més sorprenent és el de RR_0 amb el valor del 6%, que acaba resultant en una geometria molt polida, uns forats ben definits i semblants als resultats de l'apartat 4 – amb l'únic inconvenient d'haver eliminat un tros de material a la zona inferior-.

5.3.2 Conclusions de la metodologia ESO

És evident que la metodologia ESO és basada en una idea molt simple i els resultats no són els millors dins del món de l'optimització topològica, però escollint uns valors indicats dels seus paràmetres fonamentals pot resultar en una bona aproximació. A més, la senzillesa de l'algorisme el fan atractiu davant altres mètodes i, en general, s'utilitza amb eines de programació com *Matlab* que fan més ràpida l'execució del codi. La utilitat del mètode regeix en fer-se una idea de com optimitzar la peça de manera fiable sense requerir molts recursos. En cas de voler més precisió amb un mètode similar, és aconsellable avançar al BESO que, tal com expliquen [6] i [7], és més potent. No obstant això, la completa dependència dels resultats amb els paràmetres RR_0 i ER fa que a l'hora d'escollir una manera d'optimitzar una peça, es mirin abans altres mètodes.

Respecte als resultats obtinguts, la figura més semblant a una optimització realitzada en Workbench s'obté amb els valors de RR_0 i ER del 6 i 1%, respectivament (Fig 5.4 e). A continuació es mostren un parell de figures, la primera tracta d'un model similar extret de [2] amb un percentatge de volum retengut del 30% i la segona és el resultat que s'obté amb el mateix volum i fent ús de la configuració de l'ESO ideal (Fig. 5.5).

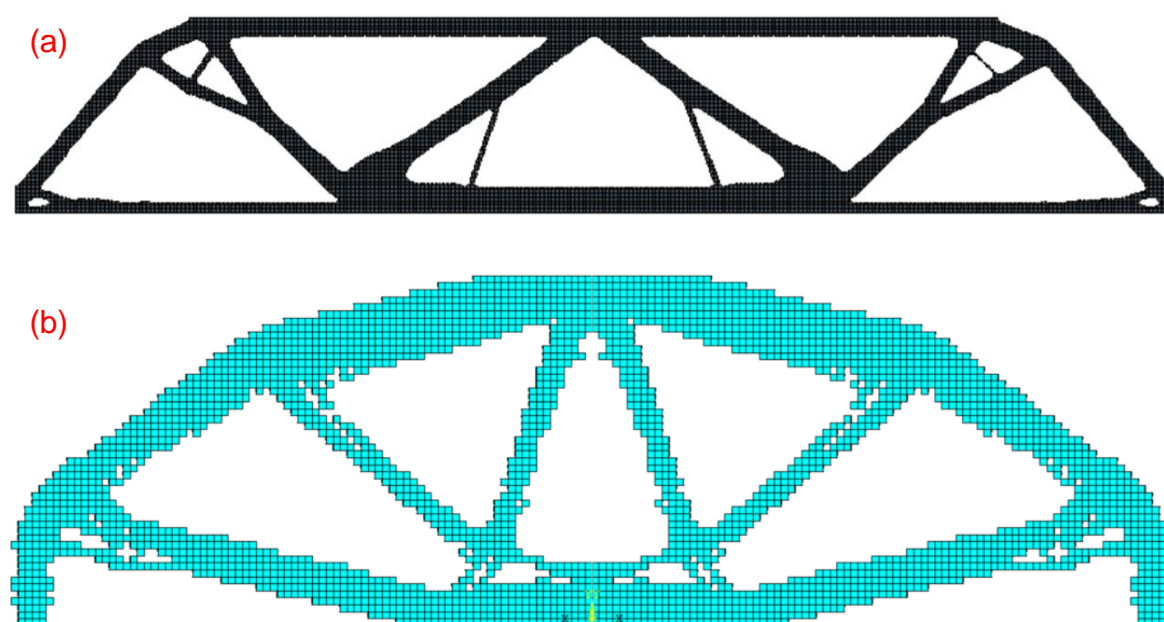


Fig. 5.5. Optimització topològica SIMP vs. ESO

Visualment els resultats són diferents, tot i compartir certes similituds. També cal considerar que els problemes no són idèntics, en la figura superior el model és de forces puntuals i restriccions de desplaçaments als nodes dels vèrtexs de la peça. Tot i això, ambdós resultats tenen 5 triangles diferenciats, fet que confirma que el mètode ESO pot obtenir resultats

coherents.

Pel que fa als desplaçaments de la figura optimitzada és evident que augmenten, ja que la peça és geomètricament menys rígida. Considerant que a la peça inicial els desplaçaments eren d'uns 8 mm com a màxim i un cop optimitzada de 13,5 mm, es verifica aquesta condició. A la següent figura es mostra aquest fet:

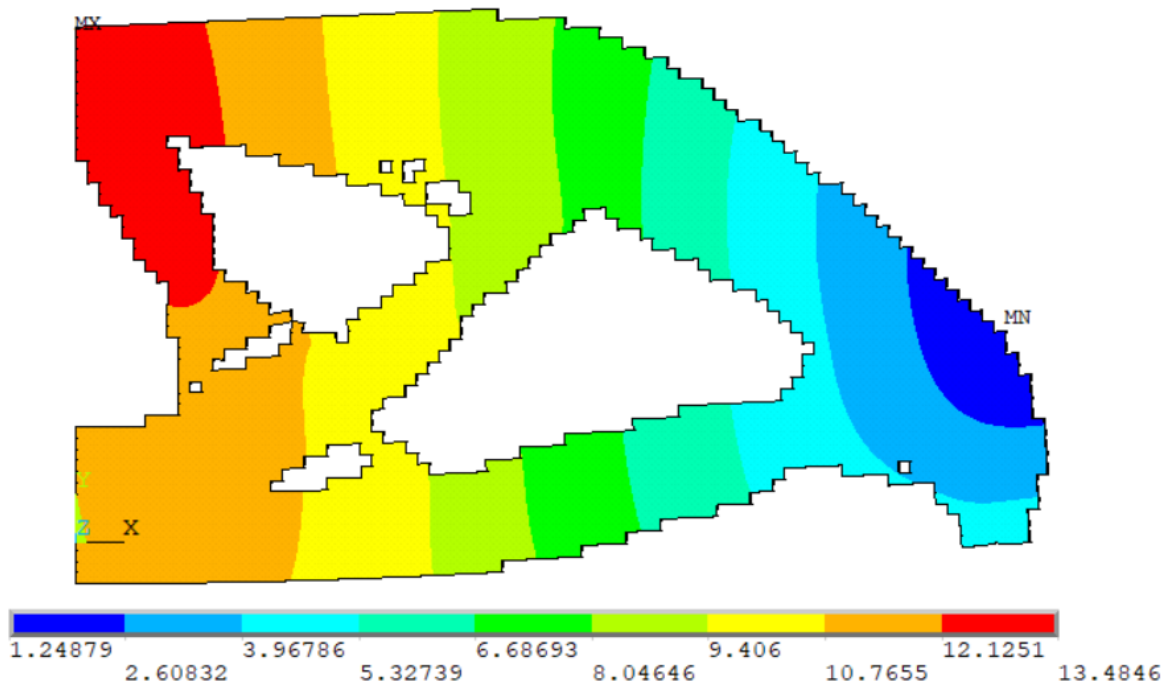


Fig. 5.6. Deformada de la peça després d'aplicar ESO

En cas de no voler assumir aquests valors de desplaçaments, caldria augmentar el volum a retenir desitjat, ja que això faria la peça molt més resistent a les sol·licitacions del problema.

5.4 Simulacions complementàries

Anteriorment s'ha conclòs que la metodologia ESO pot obtenir resultats similars als que obtindria un altre mètode existent i, si més no, pot servir com a idea qualitativa si es pretén optimitzar una peça.

És interessant observar com funcionaria el codi en altres problemes d'enginyeria i, per tal de visualitzar diferències respecte a altres mètodes d'optimització, s'han extret tres exemples presents a [2]. El conjunt de resultats també serviran per verificar la fiabilitat de l'ESO.

Model de bloc amb dues forces aplicades i suports als extrems

El primer model consisteix en un bloc on se li apliquen un parell de forces i es troba fixat en els seus extrems inferiors. Per alleugerar el processament, s'ha fet un càlcul 2D i s'ha adaptat el codi d'ESO al problema.

A les següents figures es mostren les condicions del problema, la solució en Ansys Workbench i la que s'obté amb l'ESO:

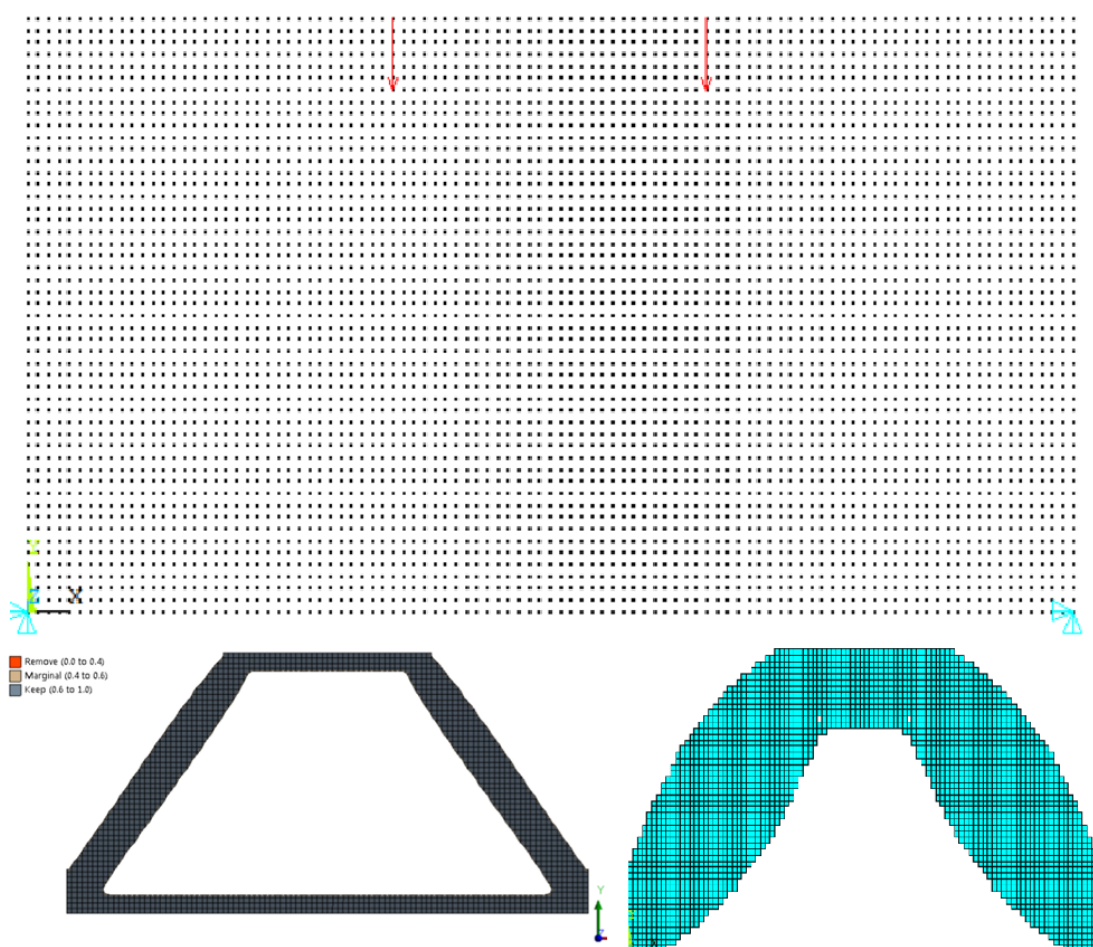


Fig. 5.7. Model de bloc amb dues forces aplicades i suports als extrems

En aquest model no hi ha una semblança evident. És cert que el percentatge de volum retintut al model del Workbench és del 30% mentre que al codi s'ha assignat un 50%, tot i això el programa ja ha eliminat tota la franja inferior de material i, per tant, mai es podrà obtenir la geometria.

Model de bloc amb força aplicada al costat i fixació de la cara oposada

Aquest segon model consisteix en un nou bloc de les mateixes dimensions el qual s'ha fixat una de les seves cares laterals i la meitat de la seva cara oposada s'han aplicat 100N. Pel que fa a l'ESO, s'ha executat la macro adaptada al problema 2D, les següents figures mostren els resultats de manera anàloga al model anterior:

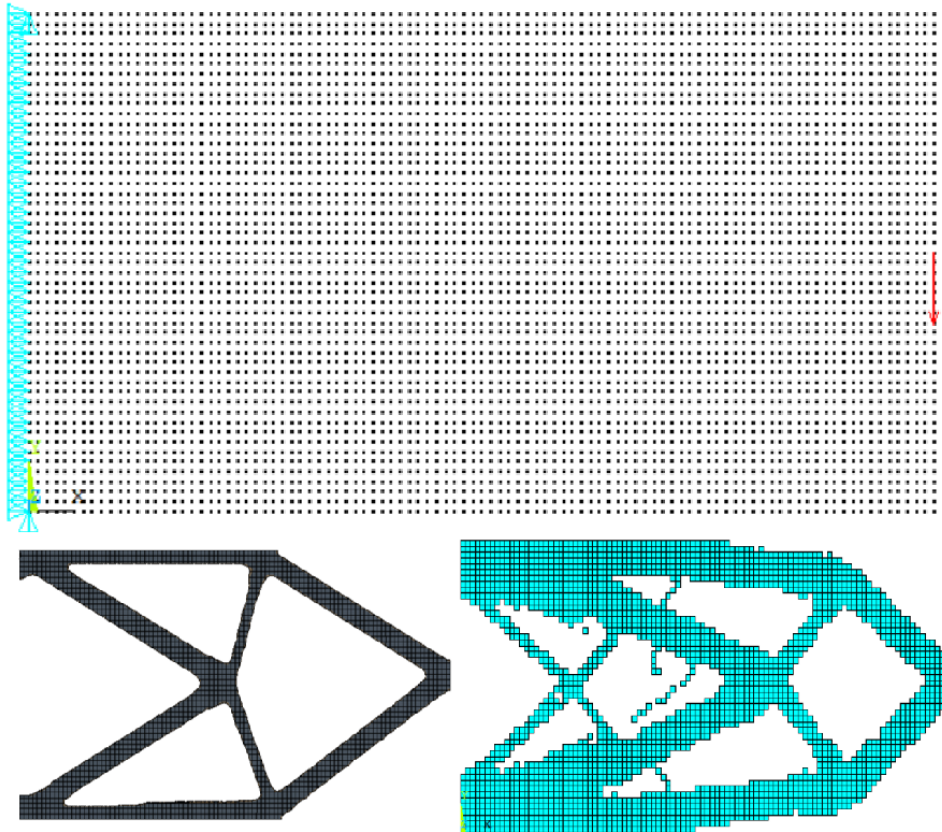


Fig. 5.8. Model de bloc amb força aplicada al costat i fixació de la cara oposada

Considerant que el problema no és idèntic, ja que hi ha discrepàncies tant en el volum retintut com en les dimensions de la peça, els resultats són bastant similars. La geometria dels forats són pràcticament iguals i l'única diferència és que en l'ESO es produeixen més branques interiors i alguns elements penjant que probablement s'eliminarien a la següent iteració.

A diferència del model anterior que no assegurava la millor geometria possible, aquest sí serveix per verificar l'eficàcia del mètode.

Model de bloc amb tres forces a la cara inferior

El model complet consisteix en tres forces aplicades i distribuïdes equidistantment a la cara inferior de la peça, tot i que per simular-lo s'ha aprofitat la simetria del problema. Pel que va a les restriccions, en el vèrtex extrem inferior hi ha un suport que restringeix el desplaçament en Y. Finalment s'ha considerat la macro modificada d'optimització en 2D novament. Les figures següents mostren els resultats de l'optimització:

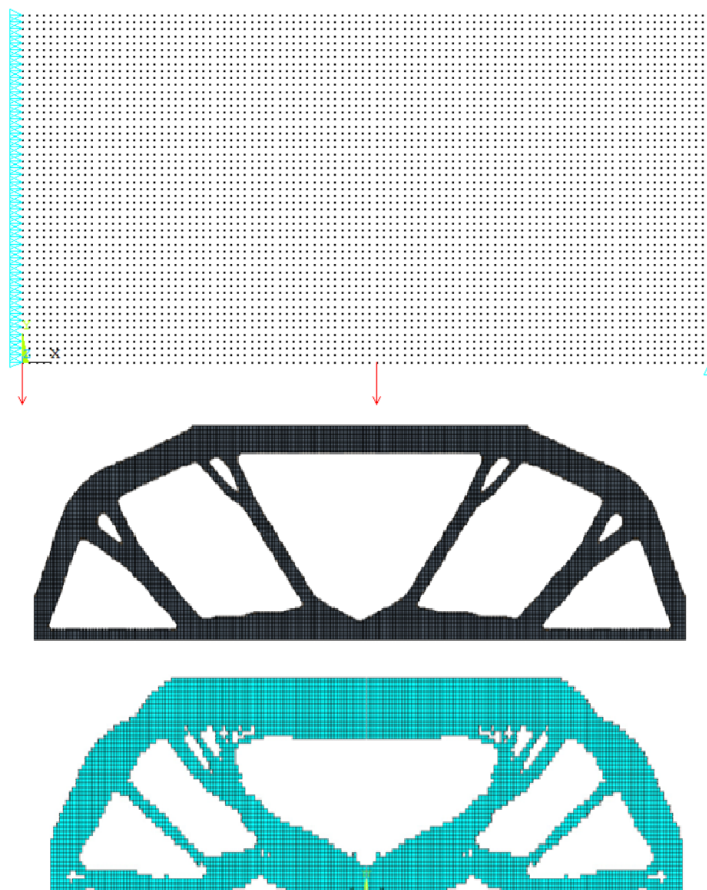


Fig. 5.9. Model de bloc amb tres forces a la cara inferior

Tal com s'ha vist a l'exemple anterior, l'ESO pot aportar resultats bons i similars als que se n'obtidrien amb mètodes més sofisticats com els que incorpora Ansys Workbench. En aquest exemple es produeixen algunes branques addicionals però els forats principals són semblants. També cal considerar que les dimensions del bloc no són les mateixes i que en els resultats del Workbench s'ha retingut un 35% del volum en vers al 50% de l'exemple a l'ESO.

Conclusions

Primerament el projecte pretenia observar els resultats d'optimitzar una peça per etapes, és a dir, optimitzar conservant un 90% del volum, fabricar la peça resultant i repetir l'optimització successivament fins que s'arribés al percentatge desitjat. Amb aquesta idea es va decidir estudiar la metodologia ESO, ja que el concepte de la mateixa és molt similar a l'objectiu del projecte, és a dir, obtenir una solució amb menys volum per optimitzar-la posteriorment. A més, no s'ha escollit el BESO perquè a experimentació actualment s'està treballant amb l'ESO.

El treball disposa de dues parts ben diferenciades, la primera és la continuació directa de [3] i la segona és l'aportació a la família de projectes [1], [2] i [3], l'estudi sobre la metodologia ESO. Tot i estar connectades treballar amb el mateix problema de la peça prismàtica rectangular, les conclusions finals no tenen relació.

Pel que fa a la primera part del projecte, els resultats han sigut com s'esperava. La idea principal era reprendre el procediment d'optimitzar una peça fabricada per DLP a partir del camp de desplaçaments obtingut mitjançant la tècnica DIC. A primera instància els resultats no eren bons, però a l'aplicar els filtres corresponents es van poder obtenir figures optimitzades molt similars als altres models optimitzats en Ansys Workbench. És cert que hi havia alguna diferència sobretot en els forats interiors, però no prou significativa per a considerar que els resultats no són els mateixos. Finalment també s'ha verificat que la peça final es deforma més a causa de la seva pèrdua de rigidesa i es considera que si no es pot assumir aquesta diferència, la solució sigui augmentar el percentatge de volum retingut.

Per altra banda, inicialment ja es sabia que el mètode ESO té un concepte molt simple i històricament s'ha qüestionat la validesa dels resultats. Personalment també segueixo aquesta línia d'escepticisme respecte a aquesta metodologia davant les figures resultants a l'optimització. Tot i haver obtingut resultats coherents que validen la metodologia, la dependència tan gran dels paràmetres RR_0 i ER fan que per certs valors el mètode perdi consistència. A més, no hi ha una manera clara de trobar els valors més òptims, fet que obliga a anar provant iterativament fins a trobar-ne els millors. Igualment si s'introdueixen valors petits, en especial per ER, sempre s'obté una optimització coherent però amb possibles diferències respecte si es fa en Workbench. Considerant que no sempre es coneix la geometria resultant a l'optimització, no és un mètode del tot pràctic. En aquest sentit seria interessant obrir una línia d'estudi cap al mètode BESO i fer una comparativa. No obstant això, també és cert que amb els paràmetres adequats es poden obtenir resultats vàlids amb la comoditat de poder executar el codi en Ansys APDL de qualsevol problema acabat de

solucionar. Aquesta comoditat junt amb la facilitat de programació fan atractiva la seva utilització, a més que l'anàlisi de deformacions i tensions és més simple a la versió APDL d'Ansys.

Per concloure, l'ESO sempre funciona si el propòsit és fer-se una idea de com serà una peça optimitzada topològicament. En cas de voler precisió caldrà fer una bona elecció dels paràmetres RR_0 i ER , tot i això mai s'asseguren els millors resultats, pel que serà necessari una ampliació a la versió BESO per augmentar la consistència de l'optimització.



Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] CASAFONT, Miquel (1995). *Topology Generation of Structures and Other Mechanical Elements*. Barcelona, 1995.
- [2] GÜERRI, Àngela. *Optimització topològica d'elements estructurals simples fabricats amb la tècnica del "Digital Light Processing"*. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Setembre 2018.
- [3] TURMO, Daniel. *Optimización topológica experimental de piezas obtenidas por fabricación aditiva tipo DLP*. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, 2019.
- [4] Alok Sutradhar, JaejongPark, Diana Carrau & MichaelJ.Miller. *Experimental validation of 3D printed patient-specific implants using digital image correlation and finite element analysis*. Computers in Biology and Medicine 52 (2014) 8–17
- [5] J Pilthammar, M Sigvant, M Hansson2 E Pålsson and W Rutgersson. *Characterizing the Elastic Behaviour of a Press Table through Topology Optimization*. J Pilthammar et al 2017 J. Phys.: Conf. Ser. 896 012068
- [6] Xiaodong Huang, and Mike Xie. *Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures: Methods and Applications*. RMIT University, Australia, 2010.
- [7] Veenendaal, Diederik. *Evolutionary Optimization of Fabric Formed Structural Elements*. Delft University of Technology, juny 2008.
- [8] Bendsøe, M.P. and N. Kikuchi. *Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 1988; 71:197–224

Bibliografia complementària

- [9] Jan Podroužek , Marco Marcon, Krešimir Nincevic & Roman Wan-Wendner 1, (2018). *Bio-Inspired 3D Infill Patterns for Additive Manufacturing and Structural Applications*. Article materials (2019).
- [10] HiramekiWorks (2002). *SOLIDWORKS add-in structural optimization software*. https://www.kke.co.jp/en/solution/theme/hiramekiworks_en.html

